

**Ю. М. БРОДОВ
И. Е. РОДИОНОВ
М. А. НИРЕНШТЕЙН**

ТУРБОГЕНЕРАТОР — ЭТО ОЧЕНЬ ПРОСТО

Учебное пособие



Министерство образования и науки Российской Федерации

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Ю. М. Бродов, И. Е. Родионов, М. А. Ниренштейн

ТУРБОГЕНЕРАТОР – ЭТО ОЧЕНЬ ПРОСТО

Рекомендовано методическим советом
Уральского федерального университета
в качестве **учебного пособия** для студентов вуза,
обучающихся по направлениям подготовки
13.03.03 «Энергетическое машиностроение»
и 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Под общей редакцией д-ра техн. наук, проф. Ю. М. Бродова

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2017

УДК 621.313.322-81(075.8)

ББК 31.261.62я73

Б88

Рецензенты:

заведующий кафедрой энергетики Уральского государственного лесотехнического университета д-р техн. наук, проф. *С. М. Шанчуров*;

профессор-консультант кафедры электрооборудования и энергоснабжения Российского государственного профессионально-педагогического университета, д-р техн. наук *Г. К. Смолин*

На обложке использовано изображение с сайта www.seogan.ru

Бродов, Ю. М.

Б88 Турбогенератор — это очень просто : учебное пособие / Ю. М. Бродов, И. Е. Родионов, М. А. Ниренштейн ; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Ю. М. Бродова. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. — 92 с.
ISBN 978-5-7996-1945-9

В учебном пособии излагается история развития и эволюция конструкций турбогенераторов от первых образцов до современных электрических машин. Приведены портреты и краткие биографические данные ученых-основоположников, внесших вклад в разработку теоретических основ, и выдающихся инженеров-конструкторов, воплотивших принцип в совершенную конструкцию турбогенераторов современных тепловых электрических станций.

Учебное пособие предназначено для абитуриентов, студентов первого курса, обучающихся по направлениям «Энергомашиностроение» и «Электроэнергетика и электротехника», а также для широкого круга читателей, интересующихся тепловой энергетикой и электротехникой.

Подготовлено кафедрой «Турбины и двигатели»

УДК 621.313.322-81(075.8)

ББК 31.261.62я73

ISBN 978-5-7996-1945-9

© Уральский федеральный университет, 2017

.....

Генератор — общее название устройств, машин, производящих какой-нибудь продукт, вырабатывающих энергию или преобразующих один вид энергии в другой.

С. И. Ожегов. Словарь русского языка

Генератор — (лат. *generator* — производитель) — вырабатывающий электрическую энергию (напр. электромашинный).

Новый энциклопедический словарь

Электромашинный генератор тока — электрическая машина, преобразующая механическую энергию в электрическую.

Политехнический словарь

Турбогенератор — электрический генератор, приводится в действие паровой или газовой турбиной.

С. И. Ожегов. Словарь русского языка

Турбогенератор является основной машиной в мире, вырабатывающей электроэнергию переменного тока.

Общеизвестный факт

ПРЕДИСЛОВИЕ

Уважаемый читатель, вы открываете книгу, написанную в жанре *non-fiction*, то есть вполне документальную и невымышленную. Но и такая литература может быть очень интересной, а главное — полезной.

Это учебное пособие предназначено, прежде всего, для студентов первого курса кафедры «Турбины и двигатели» (лучшей в МИРЕ кафедры) Уральского энергетического института (УралЭНИИ) — структурного подразделения Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина — крупнейшего федерального университета России. Пособие может быть полезно также учащимся старших классов средних школ, выпускникам колледжей (техникумов) и абитуриентам вузов при выборе будущей профессии и конкретной специальности. Эта книжка продолжает серию, начатую учебным пособием «Турбина — это очень просто», идея которой вынашивалась заведующим лучшей в мире кафедрой Ю. М. Бродовым в течение 50 лет работы (и непрерывной учебы) в стенах УрФУ (ранее УПИ им. С. М. Кирова, позднее УГТУ—УПИ)*.

* Предыдущие книги серии:

— Бродов Ю. М. Турбина — это очень просто : учебное пособие / Ю. М. Бродов, М. А. Ниренштейн, И. Б. Мурманский. Екатеринбург : УрФУ, 2012. 124 с.

— Бродов Ю. М. Двигатель внутреннего сгорания — это очень просто : учебное пособие / Ю. М. Бродов, Л. В. Плотников. Екатеринбург : УрФУ, 2015. 128 с.

— Тепловая электрическая станция — это очень просто : учебное пособие / К. Э. Аронсон [и др.]. Екатеринбург : УрФУ, 2016. 202 с

Турбогенератор — это, наряду с турбиной, важнейшая и неотъемлемая часть турбоагрегата. Он в буквальном и в переносном смысле привязан к турбине — без нее ему «трудно», он просто не может существовать. И в то же время это совершенно другое, очень сложное устройство, и задача авторов — просто и доходчиво рассказать студентам-турбинистам об этой полезной, необходимой и красивой электрической машине.

Авторы постарались сделать чтение занимательным и по мере сил развлечь читателя интересными историческими фактами, а также познакомить с учеными и инженерами, внесшими свой вклад в развитие и совершенствование турбогенераторов. Надеемся, что после прочтения этой книжки вам, дорогой читатель, будет проще определиться с будущей специальностью и легче изучать соответствующие дисциплины.



ВВЕДЕНИЕ

Электрическая энергия — самый универсальный вид энергии. Ее параметры можно менять в соответствии с потребностями производства, ее можно превращать в другие виды энергии и передавать на дальние расстояния.

Первые попытки полезного использования электричества были предприняты во второй половине XIX в. Источниками электричества поначалу служили гальванические элементы. Существенным прорывом в массовом распространении электроэнергии стало изобретение электромашинных источников электрической энергии — *генераторов*.

Даже тот, кто не знаком с латынью, отлично знает, как переводится латинское слово *generator*. Генерировать — значит производить. Среди того, что производят называемые генераторами машины, на первом месте, пожалуй, электрическая энергия. Именно для ее производства человечество создало огромное количество генераторов самых разных модификаций. По сравнению с гальваническими элементами генераторы обладали большей мощностью и ресурсом полезного использования, были существенно дешевле и позволяли задавать параметры вырабатываемого тока.

Электростанции — фабрики по производству электрической энергии, подлежащей распределению между различными потребителями — появились не сразу. Уже были придуманы и получили промышленное применение мощные тепловые

двигатели, паровые машины, паровые и газовые турбины. Однако еще в 70-х и начале 80-х гг. XIX столетия место производства энергии не было отделено от места потребления. То есть каждое производство имело свой собственный источник энергии — гидротурбину, паровую машину или турбину. Но именно с изобретением генераторов, приводимых в движение турбиной, стали появляться первые электрические станции и сети — электроэнергетика становилась отдельной отраслью промышленности.

Мы сознательно сузили всю гигантскую отрасль электротехники и ограничимся только электрическими машинами (электромашиностроением). Но и этого очень много. Из всех электрических машин мы выберем синхронные машины, а из них — неявнополюсные синхронные машины, в том числе турбогенераторы. Мы пойдем путем, показанным на рис. 1.

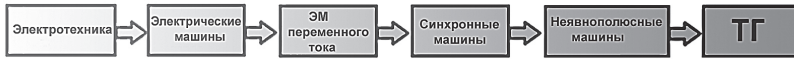


Рис. 1. Выбор предмета рассмотрения

Турбогенераторы считаются наиболее сложными среди электрических машин. В то же время турбогенераторы — наиболее распространенные из всех электрических машин. Именно с их помощью вырабатывается 80 % потребляемой в мире электроэнергии. Почему так сложилось? Хотя бы потому, что для строительства гидростанции нужны определенные природные условия. А оснащенную турбогенератором теплоэлектростанцию можно построить практически где угодно, были бы деньги и топливо в нужном количестве. Кроме того, именно турбогенераторы работают на самых мощных электростанциях — атомных.

.....

Вперед, читатель! Нас ждет много интересного.

ГЛАВА 1. ИЗ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Змея, жалившего жадно
С неба выступы дубов,
Изловил ты беспощадно,
Неустанный зверолов.
И шипя под хрупким шаром,
И в стекле согнут в дугу,
Он теперь, покорный чарам,
Светит хитрому врагу.

В. Я. Брюсов. Хвала Человеку

1.1. Как «приручили» электричество

Электрические и магнитные явления были известны человечеству с доисторических времен. Начиная с VII в. до н. э. люди пытались осмыслить природу этих явлений. Первой фундаментальной научной работой по электричеству был трактат «О магните, магнитных телах и о большом магните — Земле», который написал в 1600 г. английский ученый-физик, придворный врач королевы Елизаветы I и ее наследника Якова I Уильям Гилберт. Будучи последователем экспериментального

метода в естествознании, У. Гилберт провел более 600 искусственных опытов, открывших ему тайны «скрытых причин различных явлений». В отличие от многих своих предшественников Гилберт считал, что причиной действия на магнитную стрелку является магнетизм Земли, которая представляет собой большой магнит. Гилберт создал первую теорию магнитных явлений. Исследуя магнетизм, Гильберт занялся также и изучением электрических явлений. Он доказал, что электрическими свойствами обладает не только янтарь, но и многие другие тела: алмаз, сера, смола, горный хрусталь, электризующиеся при их натирании. Эти тела он называл «электрическими», в соответствии с греческим названием янтаря — электрон.

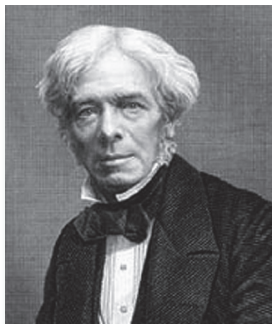


Уильям Гилберт (*William Gilbert*, 1544–1603). Именно Гилберт ввел термин «электричество».

Развитие технического прогресса, требования развивающейся промышленности и непрекращающийся научный поиск — все это с неизбежностью привело к возникновению электротехники.

Электротехника — гигантская отрасль современной промышленности. Сегодня электротехника — это область техники, связанная с получением, рас-

пределением, преобразованием и использованием электрической энергии, а также с разработкой, эксплуатацией и оптимизацией устройств, оборудования и технических систем. Под электротехникой также понимают техническую науку, которая изучает применение электрических и магнитных явлений для практического использования. Электротехника выделилась в самостоятельную науку в конце XIX в. Электротехника изучает проблемы, связанные с силовыми крупногабаритными компонентами, такими как линии электропередачи и электрические приводы.



Принято считать, что история электрических машин начинается с создания Майклом Фарадеем в 1821 г. электрического двигателя.

Майкл Фарадей (*Michael Faraday*, 1791–1867) — английский физик-экспериментатор и химик. Член Лондонского королевского общества (1824) и множества других научных организаций, в том числе иностранный почетный член Петербургской академии наук (1830).

Фарадей родился в рабочей семье и приобрел профессию переплетчика. Он, однако, не только переплетал, но и читал книги и даже пытался повторять описанные в них физические и химические опыты. Он настолько увлекся наукой, что стал посещать публичные лекции великого химика Хэмфри Дэви, основателя электрохимии. Фарадей подробно записал и переплел четыре лекции Дэви и послал их автору вместе с письмом с просьбой взять его на работу в Королевский институт. Этот, как выразился сам Фарадей, «смелый и наивный шаг» оказал на его судьбу решающее влияние. Дэви, сам начинавший жизненный путь учеником аптекаря, был восхищен обширными знаниями юноши, но в тот момент в институте не было вакантных мест. Просьба Майкла была удовлетворена лишь через несколько месяцев: в начале 1813 г. Дэви пригласил юношу на освободившееся место лаборанта.

В обязанности Фарадея входили в основном помощь профессорам и другим лекторам Королевского института при подготовке лекций, учет материальных ценностей и уход за ними. Но сам он старался использовать любую возможность для пополнения своего образования и в первую очередь внимательно слушал все лекции, подготовленные с его участием. Одновременно Фарадей, при благожелательном содействии Дэви, проводил собственные химические эксперименты. Свои служебные обязанности Фарадей исполнял

настолько тщательно и умело, что вскоре стал незаменимым помощником Дэви.

В 1813–1815 гг., путешествуя вместе с Дэви и его женой по Европе, Фарадей посетил лаборатории Франции и Италии (причем Фарадей выполнял обязанности не только ассистента, но также секретаря и слуги). Дэви — знаменитость мирового масштаба — приветствовали многие выдающиеся ученые того времени, в том числе Андре-Мари Ампер, Жозеф Луи Гей-Люссак, Алессандро Вольта. После возвращения в Англию научная деятельность Фарадея протекала в стенах Королевского института, где он сначала помогал Дэви в химических экспериментах, а затем начал самостоятельные исследования, став в конце концов известным и влиятельным ученым. Дэви называл Фарадея «своим величайшим открытием». Сын кузнеца из лондонского предместья, М. Фарадей стал самой крупной фигурой в электромеханике. Он был членом 68 научных обществ и академий, великим ученым и скромным человеком, автором глубоких научных трудов и популяризатором науки.

Главное, что было сделано Фарадеем, — это открытие электромагнитной индукции. В 1821 г. Фарадей опубликовал трактат «О некоторых новых электромагнитных движениях и о теории магнетизма», где описал, как заставить намагниченную стрелку непрерывно вращаться вокруг одного из магнитных полюсов. Принято считать описанную в трактате конструкцию первым электродвигателем в истории.

Первый электрический двигатель Фарадея (рис. 2) представляет собой постоянный магнит 1, вокруг которого вращается проводник с током 2, скользящий контакт обеспечивает ртутью, налитой в чашу 3, и верхней опорой 4. В двигателе Фарадея при постоянном токе в проводнике и постоянном магнитном поле, создаваемом постоянным магнитом, впервые реализовано непрерывное преобразование электрической энергии в механическую.

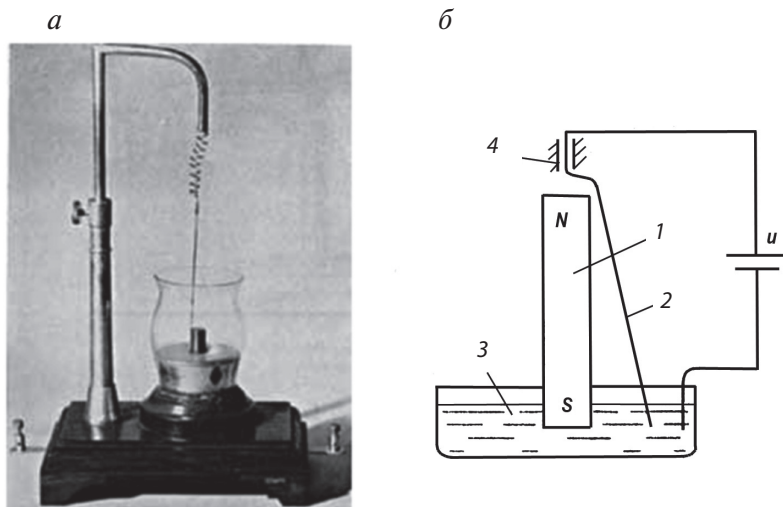


Рис. 2. Двигатель М. Фарадея:
a — общий вид; *б* — схема установки

Открытие электромагнитной индукции не было случайным, оно было подготовлено работами многих физиков. Назовем только тех, которые связаны с появлением электромашинного генератора. В 1820 г. французскими учеными Жаном Био и Феликсом Саваром был сформулирован закон действия тока на магнит. В том же году Ханс Кристиан Эрстед, тоже датчанин, как и его великий тезка и современник Ханс Кристиан Андерсен, опубликовал работу, в которой обосновывал отклонение магнитной стрелки под действием электрического тока.

В 1823 г. английский физик и математик Питер Барлоу предложил двигатель (рис. 3), который состоял из колеса *1* и постоянного магнита *2*. Как и в двигателе Фарадея, скользящий контакт создавался с помощью ртути, налитой в банку *3*, и провода, присоединенного к валу. Питание двигателя осуществлялось от батареи химических элементов.

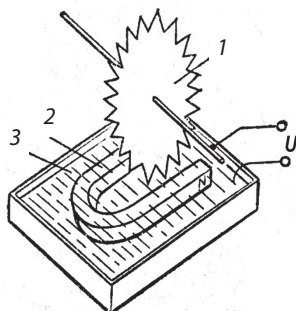


Рис. 3. Колесо Барлоу

Все эти годы физические исследования пополнялись новыми открытиями. В 1821 г. Хэмфри Дэви обнаружил влияние на проводимость температуры и материала проводника. Французский физик и астроном Доминик Франсуа Араго, брат двух известных драматургов и отец будущего министра Франции, в 1825 г. опубликовал опыт, показывающий, что вращающийся медный диск заставляет вращаться магнитную стрелку, подвешенную над ним. Это явление получило объяснение только после открытия закона электромагнитной индукции. Результаты исследований немца Георга Симона Ома (помните школьный закон Ома?) были опубликованы в 1827 г. Открытый Омом закон, выражающий связь между силой тока, напряжением и сопротивлением в цепи, давал возможность впервые количественно оценить явление электрического тока.

А теперь начинается самое главное...

В 1822 г. в рабочей тетради М. Фарадея появляется запись: «Превратить магнетизм в электричество». Проведя тысячи опытов и обобщив достижения современной ему физики, Фарадей в 1831 г. показал возможность превращения магнетизма

в электричество, открыл закон *электромагнитной индукции* — явление возникновения электрического тока в замкнутом контуре при изменении магнитного потока, проходящего через него.

Фарадей в своих опытах различал два вида индукции:

- индукцию тока током («вольтаэлектрическая индукция», по терминологии Фарадея);
- магнитоэлектрическую индукцию (возбуждение электричества при помощи магнетизма).

Однако большое количество проведенных Фарадеем экспериментов убедило его, что оба вида подчиняются одной общей закономерности. Установки, на которых Фарадей проводил свои исследования, показаны на рис. 4.

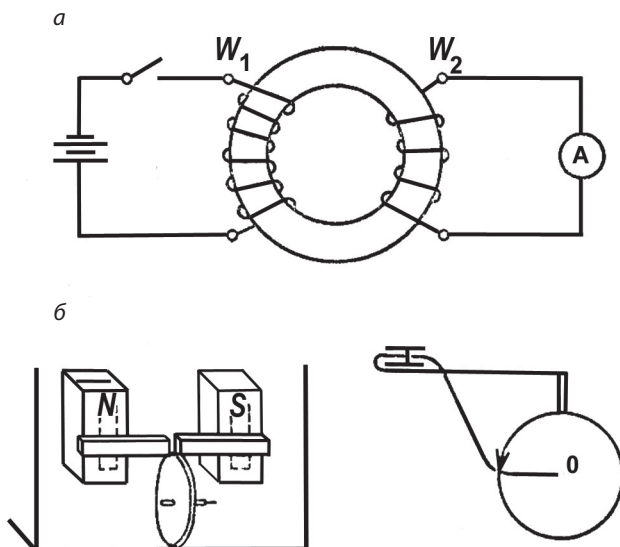


Рис. 4. Установки, на которых М. Фарадей изучал явления электромагнитной индукции

В первой группе опытов Фарадей наблюдал появление индуктированного тока во вторичной катушке W_2 при коммутации первичной катушки W_1 или при взаимном перемещении первичной и вторичной цепей. При этом в некоторых опытах для усиления явления он использовал стальные сердечники (рис. 4, а). Сам Фарадей описывал этот опыт так: «Из круглого брускового мягкого железа было сварено кольцо; толщина металла была равна семи-восми дюймам, а наружный диаметр кольца — шести дюймам. На одну часть этого кольца было намотано три спирали, каждая из которых содержала около двадцати четырех футов медной проволоки толщиной в одну двадцатую дюйма. Спирали были изолированы от железа и друг от друга и наложены одна на другую... Ими можно было пользоваться по отдельности и в соединении; эта группа обозначена буквой W_1 . На другую часть кольца было намотано таким же способом около шестидесяти футов такой же медной проволоки в двух кусках, образовавших спираль W_2 , которая имела одинаковое направление со спиралями W_1 , но была отделена от них на каждом конце на протяжении примерно полудюйма голым железом. Спираль W_2 соединялась медными проводами с гальванометром, помещенным на расстоянии трех футов от кольца. Отдельные спирали W_1 соединялись конец с концом так, что образовали общую спираль, концы которой были соединены с батареей из десяти пар пластин в четыре квадратных дюйма. Гальванометр реагировал немедленно, притом значительно сильнее, чем это наблюдалось выше, при пользовании в десять раз более мощной спиралью без железа». Следует отметить, что эта установка имела все признаки будущего устройства трансформатора.

Во второй группе опытов индуктированный ток возникал при относительных перемещениях магнита и катушки или при замыкании и разрывании магнитной цепи. Фарадей показал, что на основании этих наблюдений можно построить электромеханический генератор, который состоял бы из магнитных и полюсных наконечников, между которыми вращался бы медный диск (рис. 4, б).

Если наложить одну щетку на периферию диска, а другую — на ось и в цепь щеток включить гальванометр, то последний при вращении диска фиксирует электрический ток. Задача, поставленная Фарадеем в 1822 г., была решена: магнетизм был превращен в электричество.

Фарадей сконструировал целый ряд модификаций первого генератора. Создание первого магнитоэлектрического генератора связано с тайной, оставшейся неразгаданной. Первый электромагнитный генератор, так называемый «диск Фарадея», был демонстрационной моделью. М. Фарадей построил его, воспользовавшись идеей неизвестного изобретателя, изложенной им в письме, подписанном инициалами Р. М. «Вчера, по возвращении в город, — писал М. Фарадей в редакцию известного лондонского научного журнала 27 июля 1832 г., — я нашел закрытое письмо, оно анонимное, и я не имею возможности назвать его автора. Но ввиду того что он описывает опыт, при котором впервые удалось получить химическое разложение магнитоэлектрическим током, я посылаю вам это письмо для опубликования...»

Так и вошел в историю техники «генератор Р. М.». Эта машина представляла собой синхронный многополюсный генератор, т. е. была генератором переменного тока. Конструкция состояла из нескольких подковообразных магнитов, насаженных на колесо и вращавшихся рукояткой. Электрический ток демонстрировался разложением воды на кислород и водород.

Фарадей не создал цельной теории, описывающей природу электричества и магнетизма. Однако он ввел несколько основополагающих понятий. Фарадей впервые ввел понятие о магнитных силовых линиях. Фарадей приписывал магнитным, а затем и электрическим силовым линиям физическую реальность, наделяя эти линии свойством притяжения. Он сформировал представление о некоторой материальной среде, в которой возбуждаются электромагнитные явления и через которую передаются те или иные действия.

Продолжатель дела Фарадея, создатель классической электродинамики, его соотечественник Джеймс Клерк Максвелл дал в 1873 г. в «Трактате по электричеству и магнетизму» математическое выражение закона электромагнитной индукции. Он считал, что только переводит идеи Фарадея в математическую форму.



Джеймс Клерк Максвелл (*James Clerk Maxwell*, 1831—1879) — британский физик, математик и механик. Шотландец по происхождению. Член Лондонского королевского общества (1861). Максвелл заложил основы современной классической электродинамики (уравнения Максвелла), ввел в физику понятие электромагнитного поля. Один из основателей кинетической теории газов, получил ряд важных результатов в молекулярной физике и термодинамике. Пионер количественной теории цветов; автор трехцветного принципа цветной фотографии.

В своем трактате Максвелл писал: «Фарадей своим умственным взором видел силовые линии, пронизывающие все пространство там, где математики видели центры сил, притягивающих на расстоянии; Фарадей видел среду там, где они не видели ничего, кроме расстояний; Фарадей предполагал источник и причину явлений в реальных действиях, протекающих в среде, они же были удовлетворены тем, что нашли их в силе действия на расстоянии, приписанной электрическим флюидам».

Дальнейшие исследования электромагнитной индукции привели к установлению законов о направлении индуцированного тока. Этот закон был сформулирован в 1832 г. русским ученым Э.Х. Ленцем: «Если металлический проводник движется поблизости от гальванического тока или постоянного магнита, то в нем возбуждается гальванический ток такого направления, что если бы данный проводник был неподвижен, то ток мог бы обусловить его перемещение в противополож-

ную сторону; при этом предполагается, что покоящийся проводник может перемещаться только в направлении движения или в противоположном направлении». Открытый Ленцем закон позволил сформулировать важнейший для электротехники *принцип обратимости генераторного и двигательного режимов электрических машин*, и в 1838 г. Ленц экспериментально доказал эту возможность.



Эмилий Христианович Ленц (при рождении Генрих Фридрих Эмиль Ленц, 1804—1865) — российский физик из балтийских немцев, один из основоположников электротехники. С его именем связано открытие закона, определяющего тепловые действия тока, и закона, определяющего направление индукционного тока.

Применение электричества стало полностью энергетическим только с того момента, когда потребовался экономичный источник энергии для электрического освещения городов.

Электрическое освещение стало первым массовым энергетическим применением электрической энергии и сыграло исключительно важную роль в становлении электроэнергетики и превращении электротехники в самостоятельную отрасль. Чем было вызвано такое интенсивное развитие электроосвещения?

В течение первой половины XIX в. господствовало газовое освещение городов, имевшее существенное преимущество перед лампами с жидким горючим. Газовое освещение допускало централизацию снабжения установок светильным газом при сравнительной его дешевизне, газовые горелки были просты в производстве и обслуживании. Но по мере развития производства, роста городов, строительства крупных производственных зданий, гостиниц, магазинов и прочих помещений оно все менее удовлетворяло требованиям практики, так как было опасно в пожарном отношении, вредно для здоровья, а сила света отдельной горелки была мала.

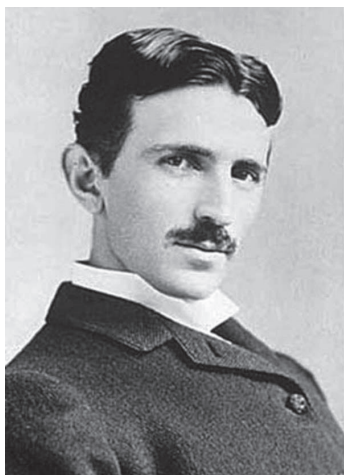
Первые осветительные установки получали ток от гальванических батарей. Это было дорого и неэкономично. Поэтому в 60-х гг. XIX в. вспомнили об электромагнитных генераторах, и начался интенсивный поиск оптимальных конструкций. Поскольку первые осветительные лампы работали на постоянном токе, то и первые генераторы были машинами постоянного тока.

Электрические машины в процессе своего развития прошли множество этапов. В разных странах разными учеными и инженерами было разработано большое разнообразие конструкций, основывающихся на различных принципах. Здесь и машины (двигатели) с возвратно-поступательным движением, разработанные американским физиком-инженером Джозефом Генри, а также петербургским академиком, выдающимся инженером Борисом Семеновичем Якоби, сыном потсдамского банкира, и генераторы с вращающимися постоянными магнитами (на основе работ М. Фарадея и француза Ипполита Пикси), а далее в основном машины постоянного тока с различными конструктивными особенностями: с самовозбуждением (изобретение Вернера фон Сименса, 1867 г.), с кольцевыми обмотками якоря (немецкий инженер Зенон Грамм, итальянский инженер Антонио Пачинотти, 1870 г.), с барабанным якорем (разработка немецкого инженера Фридриха фон Хефнер-Альтенка и Вернера Сименса, 1873 г.); машины постоянного тока с шихтованным якорем Томаса Эдисона (1880 г.).

Одновременно развивались системы переменного тока, позволяющего передавать энергию на большие расстояния, но однофазные двигатели переменного тока не имели пускового момента, их энергетические показатели были низкими, что ограничивало их применение. В конце 80-х гг. XIX в. итальянский физик и инженер Галилео Феррарис изобрел первый двухфазный двигатель переменного тока, вращающееся магнитное поле которого создавалось катушками, сдвинутыми в пространстве на 90 градусов, и токами, сдвинутыми по фазе относительно друг друга на 90 градусов. Однако Феррарис ду-

мал, что такой двигатель не сможет иметь КПД выше 50 %, поэтому он потерял интерес и не стал улучшать конструкцию. Считается, что Феррарис первым объяснил явление вращающегося магнитного поля.

В 1887 г. американец сербского происхождения, изобретатель Никола Тесла, работая независимо от Феррариса, изобрел и запатентовал двухфазный асинхронный электродвигатель с явно выраженными полюсами статора (сосредоточенными обмотками). Тесла ошибочно считал, что двухфазная система токов оптимальна с экономической точки зрения среди всех многофазных систем.



Никола Тесла (серб. Никола Тесла, англ. *Nikola Tesla*, 1856–1943) — изобретатель в области электротехники и радиотехники, инженер, физик. Родился и вырос в Австро-Венгрии, учился в Карловом университете в Праге, в последующие годы в основном работал во Франции и США. В 1891 г. получил гражданство США. Широко известен благодаря своему вкладу в создание устройств, работающих на переменном токе, многофазных систем и электродвигателя, позволивших совершить так называемый второй этап промышленной революции. Работы Теслы проложили путь современной электротехнике, его открытия имели инновационное значение. Современники-биографы считают Н. Теслу «человеком, который изобрел XX в.».

Однако, несмотря на разнообразие конструкций, хороший экономичный генератор электрического тока, производящий дешевую электроэнергию, создан не был, что тормозило расширение области применения электричества. Ученые и инженеры продолжали поиски эффективной конструкции электрогенератора.

По какому же пути должна была пойти электрификация? Точного ответа на этот вопрос поначалу не знал никто. Во всех странах шло оживленное обсуждение достоинств и недостат-

ков каждой из систем токов. Все они имели своих горячих сторонников и ожесточенных противников. Некоторая ясность в этом вопросе была достигнута только в следующем десятилетии, когда был сделан значительный прорыв в деле электрификации. Огромную роль в этом сыграла Франкфуртская международная выставка 1891 г.

В конце 80-х гг. XIX в. встал вопрос о сооружении центральной электростанции во Франкфурте-на-Майне. Многие германские и иностранные фирмы предлагали городским властям различные варианты проектов, предусматривающие применение либо постоянного, либо переменного тока. Обербургомистр Франкфурта находился в явно затруднительном положении: он не мог сделать выбор там, где это было не под силу даже многим специалистам. Для выяснения спорного вопроса и решено было устроить во Франкфурте давно планировавшуюся международную электротехническую выставку. Любая фирма могла продемонстрировать на этой выставке свои успехи, а международная комиссия из наиболее авторитетных ученых должна была подвергнуть все экспонаты тщательному изучению и дать ответ на вопрос о выборе рода тока. К началу выставки различные фирмы должны были построить свои линии передачи электроэнергии, причем одни собирались демонстрировать передачу постоянного тока, другие — переменного (как однофазного, так и многофазного). Фирме *AEG (Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft)* было предложено осуществить передачу электроэнергии из местечка Лауфен во Франкфурт на расстояние 170 км. По тем временам это было огромное расстояние, и очень многие считали тогда саму эту идею фантастической.

Когда появились первые сообщения о проекте электропередачи Лауфен — Франкфурт, электротехники во всем мире разделились на два лагеря. Одни с энтузиазмом приветствовали это смелое решение, другие отнеслись к нему как к шумной, но беспочвенной рекламе. Подсчитывали возможные потери энергии. Некоторые считали, что они составят 95 %, но даже

самые большие оптимисты не верили, что КПД такой линии превысит 15 %. Наиболее известные авторитеты в области электротехники высказывали сомнение в экономической целесообразности этой затеи. Однако один из молодых инженеров, работавших в *AEG*, Михаил Осипович Доливо-Добровольский был настолько уверен в системе и возможностях трехфазного тока, что сумел убедить руководство компании в необходимости взяться за предложенную работу.



Михаил Осипович Доливо-Добровольский (1861–1919) — известный электротехник польско-русского происхождения, один из создателей техники трехфазного переменного тока. Окончил реальное училище в Одессе в 1878 г. и сразу же поступил в Рижский политехнический институт. Для продолжения своего образования по окончании института Михаил Осипович избрал Дармштадтское высшее техническое училище, где уделялось особое внимание практическому применению электричества. В 1887 г. М. О. Доливо-Добровольский был приглашен в фирму *AEG* (*Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft*), где в 1909 г. был назначен директором и проработал в этой должности до конца жизни. Доливо-Добровольский мечтал вернуться в Россию.

Предполагалось, что он станет деканом Электромеханического факультета Санкт-Петербургского политехнического института, открывшегося в 1899 г. Этим планам помешали договорные обязательства с *AEG*, которыми Михаил Осипович был связан.

Поскольку до открытия выставки оставалось совсем мало времени, строительство линии электропередач проходило в большой спешке. За полгода Доливо-Добровольский должен был спроектировать и построить небывалый по мощности асинхронный двигатель на 100 л.с. и четыре трансформатора на 150 кВ·А, притом что максимальная мощность однофазных трансформаторов составляла тогда только 30 кВ·А. Не могло быть и речи об опытных конструкциях, на это просто не хватило бы времени. Все элементы электропередачи предстояло включить непосредственно на выставке в присутствии многих

ученых, представителей конкурирующих фирм и бесчисленных корреспондентов. Малейшая ошибка была бы непростительной. Кроме того, на плечи М. О. Доливо-Добровольского легла вся ответственность за проектирование и монтажные работы при сооружении линии электропередач. На самом деле ответственность была даже больше, ведь решался вопрос не только о собственной карьере Доливо-Добровольского и престиже *АЕГ*, но и о том, по какому пути пойдет развитие электротехники.

При разработке нового электрогенератора для генерирования трехфазных токов М. О. Доливо-Добровольский использовал якорную барабанную обмотку машины постоянного тока, предварительно разбив ее на три части и соединив эти части в треугольник, или в звезду. Так была найдена конструкция генератора, необходимого для питания связанной трехфазной системы, которая отличается той особенностью, что она требует для передачи и распределения энергии не шесть проводов, как в системе без электрической связи между фазами, а только три провода.

В Лауфене была в короткий срок построена небольшая гидроэлектростанция. Турбина мощностью 300 л. с. вращала генератор трехфазного тока, спроектированный М. О. Доливо-Добровольским и его партнером Чарлзом Брауном и построенный на заводе фирмы «Эрликон». От генератора три медных провода большого сечения вели к распределительному щиту. Здесь были установлены амперметры, вольтметры, свинцовые предохранители и тепловые реле. От распределительного щита три кабеля шли к трем трехфазным трансформаторам. Предполагалось вести электропередачу при напряжении в 15 тысяч вольт, но все расчеты делались на 25 тысяч вольт.

25 августа 1891 г. в 12 часов дня на выставке впервые вспыхнули 1000 электрических ламп, питаемых током Лауфенской гидроэлектростанции. Эти лампы обрамляли щиты и арку над входом в ту часть выставки, экспонаты которой относились

к электропередаче Лауфен — Франкфурт. Несмотря на то что линия, машины, трансформаторы, распределительные щиты изготовлялись в спешке (некоторые детали, по свидетельству Доливо-Добровольского, продумывались всего в течение часа), вся установка, включенная без предварительного испытания, к удивлению одних и к радости других, сразу же стала хорошо работать.

В октябре международная комиссия приступила к испытаниям Лауфен-Франкфуртской линии электропередачи. Было установлено, что потери при электропередаче составляют всего 25 %. Это был хороший показатель. В ноябре линия была испытана при напряжении в 25 тысяч вольт. При этом КПД ее увеличился и потери снизились до 21 %. Подавляющее большинство электриков всех стран мира (выставку посетило более миллиона человек) по достоинству оценило значение Лауфен-Франкфуртского эксперимента. Трехфазный ток получил очень высокую оценку, и ему отныне был открыт самый широкий путь в промышленность. Доливо-Добровольский сразу выдвинулся в число ведущих электротехников планеты, и имя его приобрело мировую известность.

Так была разрешена главная энергетическая проблема конца XIX в. — проблема централизации производства электроэнергии и передачи ее на большие расстояния.

А для нас особенно важно то обстоятельство, что генератор Лауфенской гидроэлектростанции приводился в действие гидротурбиной, и значит, являлся первым в истории турбогенератором!

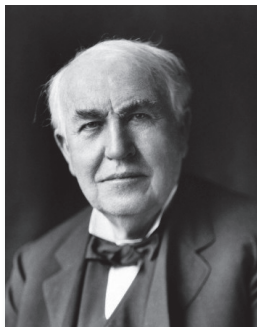
1.2. «Война токов»

«Героический» период электротехники завершился на рубеже XIX и XX столетий. К этому времени все основные технические устройства, предназначенные для производства, распределения и использования электрической энергии, были предложены и доведены до промышленного применения.

Ближайшим следствием решения проблемы передачи электроэнергии на большие расстояния явилось то, что в после-

дующие годы во всех развитых странах началось бурное строительство электростанций и широчайшая электрификация промышленности.

Каких-то 150 лет тому назад электрическая лампочка могла работать всего около 40 часов и тем более на постоянном токе. Для реального появления переменного тока в промышленности и человеческом быту необходимо было совершить ряд революционных технических открытий. Чтобы увидеть будущее, нужны глаза гениев. И гении явились. В конце XIX в. развернулась достаточно жесткая борьба, даже «война» двух основных видов электрического тока — постоянного и переменного. Главнокомандующим армией сторонников постоянного тока стал всемирно известный американский изобретатель, электротехник и предприниматель Томас Алва Эдисон, а по другую сторону баррикад, со стороны переменного тока, сражался гениальный хорватско-сербский и американский электротехник Никола Тесла, поддерживаемый крупным американским промышленником и инженером Джорджем Вестингаузом, изобретателем пневматического железнодорожного тормоза. Кроме того, Дж. Вестингауз разработал способы безопасной транспортировки природного газа по металлическим трубам на большие расстояния и усовершенствовал электрический трансформатор.



Томас Алва Эдисон (*Thomas Alva Edison*, 1847–1931) — американский изобретатель-самоучка и крупный предприниматель. Эдисон получил в США 1093 патента и около 3 тысяч патентов в других странах мира. Он усовершенствовал телеграф, телефон, киноаппаратуру, разработал один из первых коммерчески успешных вариантов электрической лампы накаливания, изобрел фонограф. Именно он предложил использовать в начале телефонного разговора слово «алло». В 1928 г. награжден высшей наградой США — Золотой медалью Конгресса. В 1930 г. стал иностранным почетным членом Академии Наук СССР.

В 1884 г. Эдисон принял на работу молодого сербского инженера Николу Теслу, в обязанности которого входил ремонт электродвигателей и генераторов постоянного тока. Тесла же предлагал для генераторов и силовых установок использовать переменный ток. Эдисон довольно холодно воспринимал новые идеи Теслы, между ними постоянно возникали споры. Тесла утверждал, что весной 1885 г. Эдисон пообещал ему 50 тыс. долларов (по тем временам сумма примерно эквивалентна 1 млн современных долларов), если у него получится конструктивно улучшить электрические машины постоянного тока, придуманные Эдисоном. Никола активно взялся за работу и вскоре представил 24 разновидности машины Эдисона на переменном токе, новый коммутатор и регулятор, значительно улучшающие эксплуатационные характеристики. Одоблив все усовершенствования, в ответ на вопрос о вознаграждении Эдисон отказал Тесле, заметив, что эмигрант пока плохо понимает американский юмор. Оскорбленный Тесла немедленно уволился. Через пару лет Тесла открыл по соседству с Эдисоном собственную компанию *Tesla Electric Light Company*. Эдисон же начал широкую информационную кампанию против переменного тока, утверждая, что он опасен для жизни.

Электрогенераторы Т. Эдисона с выходным рабочим постоянным напряжением от 100 до 200 вольт могли эффективно работать только на расстоянии чуть больше 1,5 км. Ликвидировать этот недостаток можно было за счет использования медных проводов очень большого поперечного сечения или строительства множества локальных электростанций. Однако все это было достаточно сложным техническим мероприятием, и главное — крайне дорогим. К тому времени в мире уже появились сравнительно дешевые и эффективные трансформаторы для переменного тока, а вместе с ними и возможность передавать электроэнергию с малыми потерями на сотни километров. К этому времени в Европе, благодаря изобретениям Михаила Осиповича Доливо-Добровольского, была разработана трехфазная система генерирования и потребления перемен-

ного электрического тока. В 1889 г. им был создан трехфазный асинхронный двигатель переменного тока, содержащий распределенную по статору обмотку и короткозамкнутую обмотку ротора, прообраз современного электродвигателя. На приглашение М. О. Доливо-Добровольского ознакомиться в Берлине с этим электродвигателем Т. Эдисон заявил: «Переменный ток — это вздор, не имеющий будущего».

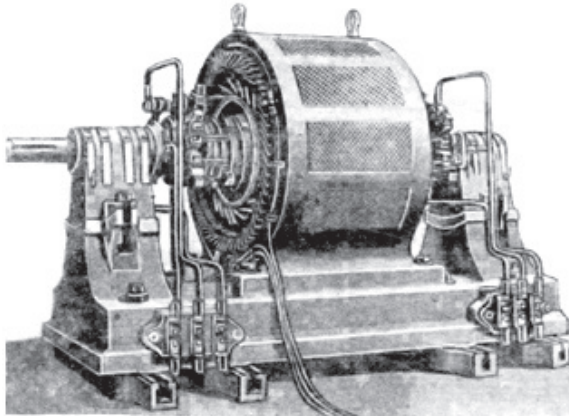


Рис. 5. Двигатель М. О. Доливо-Добровольского

В борьбе двухфазного и трехфазного токов сначала взяла верх компания Дж. Вестингауза, которая, купив патенты Н. Теслы, старалась распространить двухфазный ток. Триумфом двухфазной системы стало строительство в 1896 г. мощной ГЭС на Ниагарском водопаде. Но трехфазный ток вскоре повсеместно был признан наилучшим. Действительно, двухфазная система требовала проведения четырех проводов, а трехфазная — только трех. Кроме большей простоты она сулила значительную экономию средств. Позже Н. Тесла, по примеру Доливо-Добровольского, предложил объединять два обратных провода вместе. При этом происходило сложение токов, и в третьем проводе тек ток примерно в 1,4 раза больше, чем в двух других. Поэтому сечение этого провода было в 1,4 раза

больше (без этого увеличения сечения в цепи возникали перегрузки). В результате затраты на двухфазную проводку все равно оказывались больше, чем на трехфазную, к тому же двухфазные двигатели по всем параметрам уступали трехфазным. В XX в. трехфазная система утвердилась повсеместно. Даже Ниагарская гидроэлектростанция была со временем переоборудована на трехфазный ток.

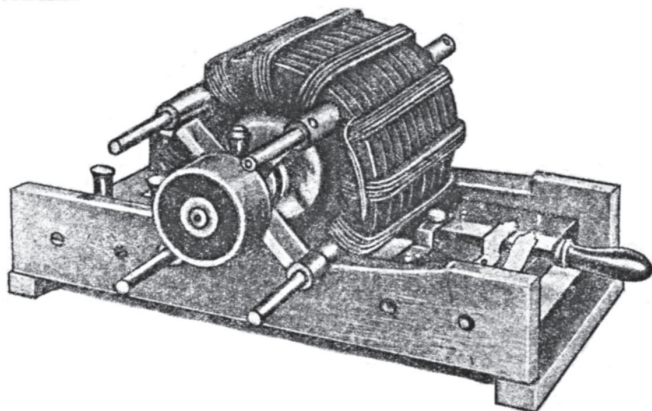


Рис. 6. Двигатель Н. Теслы

«Война токов» закончилась в ноябре 2007 г. с исчезновением в Нью-Йорке последнего потребителя постоянного тока, когда главный инженер компании «Консолидейтед Эдисон», которая предоставляла электроснабжение постоянным током, перерезал символический кабель.

Однако постоянный ток широко используется и сегодня в медицине и технике: на транспорте, в гальванизации и гальванопластике, в электролизе, в электродуговой и электрогазовой сварке.

1.3. Первые турбогенераторы

Потребность в производстве больших количеств электроэнергии оказала влияние на всю первичную энергетику — теплоэнергетику и гидроэнергетику — и стимулировала созда-

ние мощных синхронных генераторов, приводимых в действие паровыми и гидравлическими турбинами.

Турбогенераторы впервые появились уже в конце 1890-х — начале 1900-х гг. в связи с развитием турбин Парсонса и Кертиса-Рато, имеющих большую мощность и КПД. Для получения при помощи высокоскоростных паровых турбин большого количества электрической энергии более прогрессивными явились быстроходные синхронные машины, в сравнении с машинами постоянного тока, мощность которых при высокой скорости вращения ограничена из-за наличия коллектора. В 1895 г. в городе Франкфурт-на-Майне были пущены в эксплуатацию первые три турбогенератора общей мощностью 1500 кВт, это были генераторы однофазного переменного тока, они имели шесть полюсов на роторе и скорость вращения 1000 об/мин.

Хотя к тому времени трехфазный ток уже был известен не только в принципе, но и использовался на практике, удобство трансформации и передачи электрической энергии трехфазного тока на значительные расстояния и преимущество трехфазного асинхронного двигателя были очевидны. В результате успеха М. О. Доливо-Добровольского система трехфазного тока быстро получила всеобщее признание и широкое распространение и вытеснила систему постоянного тока.

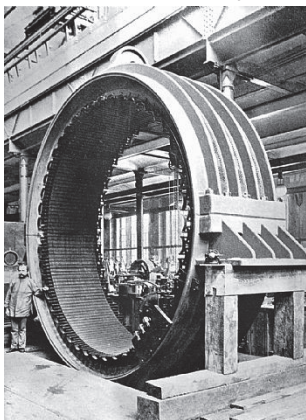


Рис. 7. Статор генератора фирмы «Сименс». Фото 1897 г.

Турбогенераторы трехфазного тока с цилиндрическим ротором впервые появились в 1900—1901 гг. В последующие годы их конструкции быстро совершенствовались и развивались в направлении по роста единичных мощностей. Крупнейшие турбогенераторы в период 1900—1920 гг. изготавливались шестиполусными из-за ограниченных возможностей металлургии по изготовлению поковок для роторов. В 1920 г. в США был изготовлен самый мощный для того времени турбогенератор мощностью 62,5 МВт, частотой вращения 1200 об/мин. Двухполусные турбогенераторы выполнялись мощностью лишь до 5,0 МВт.

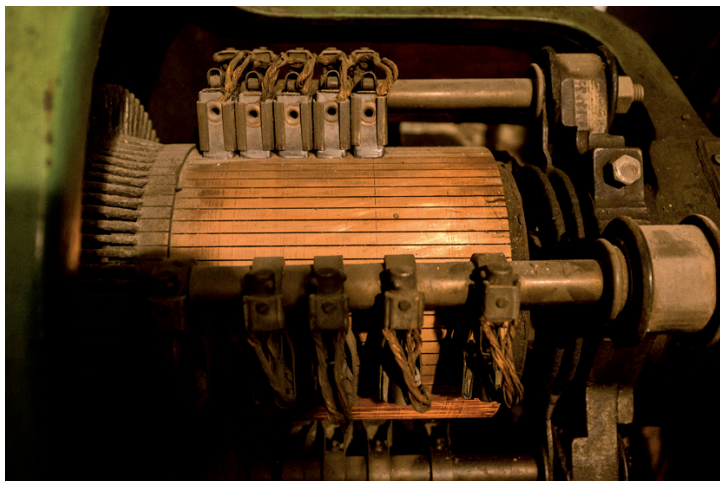


Рис. 8. Щетки турбогенератора фирмы «Вестингауз». Фото 1909 г.

После 1920 года основное развитие получили двух- и четырехполусные турбогенераторы. Единичные мощности быстро росли. В 1920—1930 гг. были построены турбогенераторы мощностью 20 МВт на 1800 об/мин (США, 1928 г.) и мощностью 80 МВт на 3000 об/мин (Германия, 1930 г.). Ведущими странами в области турбогенераторостроения были и остаются Англия, Германия, Россия, США, Франция, Швейцария, Япония.

1.4. Промышленное производство турбогенераторов в России и за рубежом

Темпы электрификации народного хозяйства России в начале XX в. были весьма скромными. В наиболее успешном 1913 г. Россия занимала 6-е место в Европе и 8-е в мире по производству электроэнергии, отставая от США более чем в 12 раз. Отечественные электростанции работали, как правило, разрозненно, давали энергию переменного тока однофазной или трехфазной системы различной частоты и напряжения, а в отдельных случаях даже постоянного тока, что практически исключало их объединение для параллельной работы.

Немногочисленные заводы электропромышленности России работали на основе технической документации зарубежных фирм, а зачастую просто собирали оборудование из привезенных деталей и элементов. Например, нынешний завод «Электросила» начинался в 1853 г. как отделение немецкой фирмы «Сименс-Гальске». Лишь в 1898 г. было организовано «русское» акционерное общество «Сименс-Шуккерт», куда и вошел этот завод. Здесь производились машины постоянного тока и изобретенные М. О. Доливо-Добровольским асинхронные трехфазные двигатели. Аналогичный завод «Вольта» существовал в Ревеле (нынешний Таллинн, Эстония).

Первый турбогенератор в нашей стране мощностью 500 кВт был изготовлен в 1924 г. заводом «Электросила». В том же году были изготовлены еще два турбогенератора мощностью по 1500 кВт. Эти первые машины послужили основой для создания в последующие годы серии турбогенераторов в диапазоне мощностей от 0,5 до 24 МВт при частоте вращения 3000 об/мин. За 1926 и 1927 гг. было создано 29 таких турбогенераторов. Эти машины создавались под руководством выдающегося инженера-организатора производства Адольфа Селестиновича Шварца. В 1919 г. А. С. Шварц был единственным в Советской России специалистом с опытом работы на круп-

ном электромашиностроительном производстве. Его стараниями завод быстро обогатился квалифицированными кадрами, была создана передовая по меркам своего времени технология.



Адольф Селестинович Шварц (1878–1950). Родился в Женеве, окончил политехнический институт в Цюрихе (1900) как инженер-электрик. Работал по проектированию электрических машин в фирме «Броун-Бовери» (Швейцария, 1900–1915), на заводе «Вольта» в Ревеле (Таллине), в Объединенном правлении АО «Сименс-Шуккерт» в Петрограде (1917–1919). С 1919 г. технический директор завода динамомашин «Электросила». Возглавлял проектные и исследовательские работы по созданию первых отечественных гидрогенераторов для Волховской ГЭС; внес большой вклад в решение других инженерных проблем развития производства на заводе «Электросила». Арестован

в первый раз в 1930 г., второй раз в 1937 г. Освобожден благодаря вмешательству Г. К. Орджоникидзе. В 1937 г. выехал в Швейцарию.

Когда правительство приступило к воплощению плана ГОЭЛРО*, предполагалось весь заказ на изготовление турбогенераторов отдать известной шведской фирме ASEA, потому что в России ничего подобного не делали. А. С. Шварц начал создавать на заводе коллектив молодых талантливых ученых, инженеров и рабочих — основу будущей советской школы электромашиностроения. В 1923 г. к работе подключились выпускники и преподаватели Петроградского электротехнического института Александр Емельянович Алексеев (впоследствии член-корреспондент АН СССР) и Роберт Андреевич Лютер (в дальнейшем лауреат Государственной премии).

Молодой коллектив создал настолько убедительный проект, что «Электросиле» отдали заказ на четыре из восьми ги-

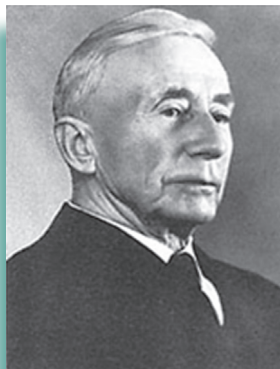
* ГОЭЛРО — Государственный план электрификации СССР, разработанный Государственной комиссией по электрификации России по заданию и под руководством В. И. Ленина, утвержденный декретом Совета народных комиссаров «Об электрификации РСФСР» на IX Всероссийском съезде Советов (23–28 декабря 1921 г.).

дрогенераторов Волховской ГЭС. Станцию пустили в декабре 1926 г., полностью ввели все агрегаты в 1927 г., а к 1928 г. были закончены технические испытания. Наши генераторы выдержали все испытания, к шведским же были претензии, потребовалась их доработка.

Роберт Андреевич Лютер (Роберт Юстус Карл Лютер, 1889—1976), инженер-электрик, математик и пианист, один из прямых потомков двоюродного брата великого религиозного реформатора Мартина Лютера. Р.А. Лютер родился в Москве, в семье потомственного почетного гражданина. По традиции «русских немцев» родными языками в семье были немецкий и русский. После переезда семьи в Петербург окончил Первое реальное училище (1906) и Электротехнический институт Императора Александра III (в советское время ЛЭТИ — Ленинградский электротехнический институт, ныне Государственный электротехнический университет) с золотой медалью (1911). Его дипломный проект «Электрификация Сурамского перевала Кавказской железной дороги по системе трехфазного тока» практически без изменений был использован комиссией ГОЭЛРО при электрификации Кавказа. Роберт Андреевич окончил также Санкт-Петербургскую консерваторию по классу рояля.



Александр Емельянович Алексеев (1891—1975), инженер-электрик. Родился в Тверской губернии. Окончил Ленинградский электротехнический институт (1925). Профессор (1934), член-корреспондент Академии наук СССР (1953). Работал конструктором, начальником отдела на заводе «Электрик» (1908—1923); с 1924 г. работал на заводе «Электросила» конструктором, начальником отдела новых конструкций, с 1933 г. техническим директором завода. С 1936 г. заведующий кафедрой электрических машин в Ленинградском институте инженеров железнодорожного транспорта. Руководил созданием первых советских тяговых электрических машин, турбо- и гидрогенераторов. Лауреат Сталинских премий СССР (1949, 1951). Автор более 100 научных работ.



В начале 30-х гг. на заводе «Электросила» была создана новая серия турбогенераторов мощностью от 0,75 до 50 МВт. Существенное значение имело то, что при создании этой серии был широко использован опыт западной Европы и США в турбогенераторостроении. По сравнению с предшествующей серией удалось снизить массу меди в обмотке статора на 30 %, а электротехнической стали на 10—15 %. При этом была уменьшена трудоемкость изготовления. Все электромагнитные, тепловые, вентиляционные и механические расчеты были выполнены по новым расчетным методикам. Машины изготавливались из отечественных материалов. Уже к 1 января 1935 г. на отечественных тепловых электростанциях было смонтировано 12 таких турбогенераторов мощностью по 50 МВт. Особое значение имеет цикл исследований и разработок, завершившихся изготовлением в 1937 г. самого мощного в мире турбогенератора на 100 МВт с частотой вращения 3000 об/мин и косвенным воздушным охлаждением. Основные трудности были связаны с ротором. Metallурги справились с созданием поковки больших размеров из высококачественной стали, а электромашиностроители — с ее механической обработкой, потребовавшей исключительно высокой точности.

После окончания войны необходимо было увеличить темпы развития энергетики. На Ленинградском металлическом заводе (ЛМЗ) возросло количество выпускаемых паровых турбин мощностью 25, 50 и 100 МВт. Масштабы работ на «Электросиле» должны были соответствовать этому, потому что каждой турбине нужен свой генератор.

В последующие годы возникла необходимость в освоении турбогенераторов большей мощности — 200, 300, а дальше 500, 800, 1000 и даже 1200 МВт при частоте вращения 3000 об/мин. Исследования, разработки и производство мощных турбогенераторов проводились в СССР на трех заводах: «Электросила» (г. Ленинград), «Электротяжмаш» (г. Харьков) и «Сибэлектромаш» (г. Новосибирск). На каждом из заводов создавались свои конструкции и технологические процессы. Увеличение

мощности строящихся электростанций потребовало, кроме совершенствования конструкции турбогенераторов, более интенсивного охлаждения его элементов.

Способ охлаждения машины определяет мощность, технико-экономические показатели, особенности конструкции, технологичность и надежность эксплуатации турбогенератора. Первые турбогенераторы охлаждались самым простым способом — воздушным. Впоследствии для охлаждения рабочих частей генератора на помощь воздуху пришли вода и водород. Сегодня подавляющее большинство турбогенераторов охлаждается водородно-водяным способом. Вода является наиболее эффективным хладагентом благодаря своей высокой теплоотводящей способности и относительно меньшим затратам на ее прогонку.

На заводе «Электросила» впервые в мировой практике было предложено и освоено водородное охлаждение роторов, а также водяное охлаждение обмотки статора. Использование водорода началось в 1946 г. с турбогенератора мощностью 100 МВт с частотой вращения 3000 об/мин. Он имел косвенное водородное охлаждение для роторной и статорной обмоток. Вполне естественно, что система охлаждения сердечника статора была в принципе такой же, как и при воздушном охлаждении. Потребовался переход от косвенного охлаждения обмоток к непосредственному. Под руководством инженеров А. Б. Шапиро и И. А. Кади-Оглы были разработаны оригинальные турбогенераторы с интенсивным водяным охлаждением обмоток ротора и статора, сердечника статора и некоторых конструктивных элементов. Первый турбогенератор с полностью водяным охлаждением мощностью 63 МВт и частотой вращения 3000 об/мин был введен в эксплуатацию в 1969 г. В дальнейшем были выпущены еще три такие машины. В 1980 г. был включен турбогенератор мощностью 800 МВт и частотой вращения 3000 об/мин. В дальнейшем начали работать еще четыре машины.

На заводе «Электротяжмаш» (г. Харьков) разработка и изготовление турбогенераторов мощностью 200, 300 и 500 МВт

и частотой вращения 3000 об/мин проводились главным конструктором завода Л. Я. Станиславским. В машине мощностью 200 МВт применен ротор с водородным, а статор с водяным охлаждением. В турбогенераторе мощностью 300 МВт используется непосредственно водородное охлаждение как для роторной, так и для статорной обмоток. Турбогенератор мощностью 500 МВт выполнен с полностью водяным охлаждением.

На заводе «Сибэлектротяжмаш» (г. Новосибирск) был освоен турбогенератор мощностью 500 МВт и частотой вращения 3000 об/мин с масляным охлаждением обмотки статора и сердечника и водяным охлаждением обмотки ротора. Напряжение статорной обмотки составляло 35 кВ (вместо общепринятого максимального 24 кВ), что существенно облегчило токоподводы от генератора к повышающему трансформатору.

Подводя итоги исторического развития турбогенераторов в послевоенные годы, следует отметить разработку в нашей стране единой для всех заводов унифицированной серии турбогенераторов. В основу серии в России были положены турбогенераторы с водно-водородным охлаждением производства объединения «Электросила», поскольку их число было наибольшим и имелся положительный опыт их эксплуатации во всем диапазоне мощностей от 63 до 800 МВт при частоте вращения 3000 об/мин.

Особая глава в истории энергетики нашей страны — атомные электростанции (АЭС). Первая в мире АЭС мощностью в 5 МВт была пущена в опытно-промышленную эксплуатацию в далеком 1954 г. в городе Обнинске Калужской области. Но уже в 1958 г. закончено возведение первой очереди Нововоронежской АЭС с реактором в 210 МВт электрической мощности. В 1966 г. была пущена первая очередь Билибинской атомной теплоэлектроцентрали (АТЭЦ) на Чукотке мощностью в 12 МВт, в следующем году — первая очередь Белоярской АЭС на Урале (два реактора на 100 и 200 МВт). Далее ввод мощностей на советских АЭС стал расти высокими темпами. Ко второй половине 80-х гг. в СССР эксплуатировалось десять АЭС и АТЭЦ: Билибинская (48 МВт), Армянская (817,5 МВт), Белоярская на Урале

(900 МВт), Кольская (1760 МВт), Нововоронежская (2455 МВт), Игналинская в Литве (3000 МВт), Ленинградская (4000 МВт), Чернобыльская на Украине (4000 МВт), Курская (4000 МВт), Калининская (2000 МВт). Эти станции обеспечивали около 20 % годовой выработки электроэнергии в СССР.

Общественно-политический и экономический кризис 90-х гг. в России не обошел стороной и энергетику. Введение новых мощностей на электростанциях резко сократилось. Однако конструкторские коллективы турбинных заводов и завода «Электросила» продолжали совершенствовать свою продукцию. В частности, на «Электросиле» освоили производство турбогенераторов на 800 МВт с водяным охлаждением, за что в 2003 г. коллектив разработчиков (Кади-Оглы И. А., Иогансон В. И., Чернявский В. Д. и др.) был удостоен Государственной премии. Надежность, безопасность, пожаростойкость таких машин существенно выше по сравнению с машинами, имеющими водородное охлаждение. За такими машинами будущее.



Ибрагим Ахмедович Кади-Оглы, кандидат технических наук, главный конструктор турбогенераторов завода «Электросила»



Вадим Игоревич Иогансен, кандидат технических наук, начальник бюро расчетов отдела турбогенераторов завода «Электросила»



Владимир Павлович Чернявский, ведущий инженер-конструктор отдела турбогенераторов завода «Электросила»

Взрывы водорода при авариях и последующие пожары приводили к человеческим жертвам и существенным материальным издержкам, что заставляло инженеров предпринимать попытки избавиться от опасного охладителя. Над разработкой турбогенераторов с полным водяным охлаждением работали шведская *ASEA* (теперь подразделение *Alstom*), английская *Parsons*, японская *Toshiba* и другие компании. Но первый такой генератор был создан в СССР. В 60-х гг. на «Электросиле» под руководством главного конструктора Арона Шапиро началась разработка схемы водяного охлаждения генератора для подводных лодок. В 1970 и в 1980 гг. на ТЭЦ в Ленинграде и Рязани запустили экспериментальные генераторы.

Итогом работы конструкторов «Электросилы» стал турбогенератор, не имеющий аналогов в мире. То есть турбогенераторы с полным водяным охлаждением за рубежом разработаны, но эксперты справедливо считают, что они уступают электросиловскому по надежности, простоте обслуживания, ремонтпригодности. Ахиллесова пята зарубежных турбогенераторов — система охлаждения обмоток ротора: воду закачивают в ротор под давлением, усложняя конструкцию множеством стальных и изоляционных трубок, уплотнений и паяных соединений. Особенность конструкции турбогенераторов новой серии решили зашифровать в буквах и цифрах типового обозначения: «ТЗВ» — не что иное, как «турбогенератор три воды» или просто «три воды», как называют серию на «Электросиле». Почему вод, как в сказке, именно три? Потому что столько у генератора цепей охлаждения: ротор, обмотка статора и сердечник статора.

Система подачи воды, разработанная на «Электросиле», устроена так, что ротор сам представляет собой центробежный насос, самостоятельно засасывающий дистиллированную воду, подаваемую струей из неподвижного коллектора, и свободно сбрасывающий ее в сливную камеру. По словам Ибрагима Кади-Оглы, главного конструктора турбогенераторов

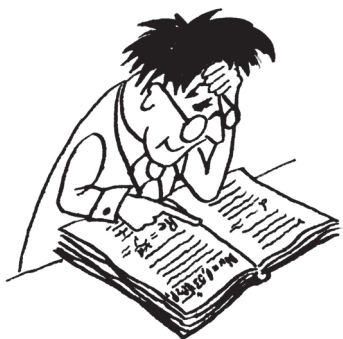
«Электросилы», самонапорная система охлаждения обмоток ротора — это «ноу-хау» их предприятия, которое пока не удалось воспроизвести никому в мире. Так что «Электросила» получила премию за работу действительно государственного значения.

В зарубежной практике (Франция, Англия, Швеция, Швейцария) проблема выпуска машин единой конструкции обычно решается путем объединения электротехнических фирм и специализации производства. Это позволяет унифицировать конструкции турбогенераторов, что облегчает проектирование и строительство, монтажные, наладочные и ремонтные работы, а также обеспечение запасными частями.

Динамично развивалось производство турбогенераторов зарубежными фирмами. Фирма «Альстом-Атлантик» выпустила серию четырехполюсных турбогенераторов (1500 об/мин) мощностью 1600 МВ·А (мегавольтампер) для атомных электростанций; предельная мощность четырехполюсных турбогенераторов для атомных электростанций фирмы «Сименс» составляет около 1300 МВ·А. Фирма АВВ освоила выпуск турбогенераторов мощностью 1500 МВ·А на 1800 об/мин и частоту 60 Гц, а также турбогенераторов мощностью 1230 МВ·А на 3000 об/мин и 50 Гц. Американские и японские фирмы выпускают турбогенераторы наибольшей мощности около 1100 МВ·А. Все фирмы за исключением «Сименс» используют водородно-водяное охлаждение, причем фирма «Сименс» применяет водяное охлаждение для обмоток не только статоров, но и роторов.

.....

*На этом история турбогенератора не заканчивается.
Но, наверное, пришла пора разобраться в принципах
работы и устройстве турбогенератора.
Об этом расскажет следующая глава.*



Студенты — остроумные люди

Поспорили как-то строитель, садовник и, как вы уже догадались, электрик, чья профессия древнее.

Строитель говорит:

— Мы, строители, великие пирамиды построили.

Садовник аргументирует:

— Мы, садовники, райский сад засаживали.

А электрик так спокойно им говорит:

— Когда Бог сказал: «Да будет свет!», у нас уже вся проводка была разведена.

Электрик на службе: «Последний патрон — для себя!»

Поздно вечером молодая блондинка звонит своей подруге-соседке:

— Люсь, я знаю, куда девается свет, когда его везде выключашь.

— Ну и куда?

— Заходи, покажу!

Подруга приходит. Люся выключает свет во всех комнатах, затем открывает дверцу холодильника и торжествующе говорит: «ВОТ СЮДА!»

Большинство электрических приборов потребляют меньше электричества в выключенном состоянии.



ГЛАВА 2. КАК РАБОТАЕТ ГЕНЕРАТОР?

Электрические машины — это электромеханические преобразователи, в которых осуществляется преобразование электрической энергии в механическую (*двигатели*) или механической в электрическую (*генераторы*). Основное отличие электрических машин от других преобразователей в том, что они *обратимы*, т. е. одна и та же машина может работать и в режиме двигателя, и в режиме генератора. Особняком стоят трансформаторы, которые преобразуют электрическую энергию одного напряжения в электрическую энергию другого напряжения.

Чтобы понять принцип действия генератора, мы пойдем от простого к сложному. Рассмотрим сначала работу простейшей машины переменного тока. Будем считать, что она работает в режиме генератора, который приводится во вращение каким-нибудь механическим двигателем и преобразует механическую энергию в электрическую.

На рис. 9 показана машина, магнитная система которой состоит из двух неподвижных в пространстве полюсов N — S , создающих постоянный по величине магнитный поток. По общему правилу в пространстве между полюсами N — S линии этого потока направлены от северного полюса N к южному полюсу S . В этом же пространстве находится вращающийся *якорь*, на по-

верхности которого уложен в диаметральной плоскости виток (контур) $ab—cd$; концы витка присоединены к двум кольцам, плотно посаженным на вал, а на кольца наложены неподвижные щетки AB , к которым присоединяется внешняя цепь, состоящая из каких-либо приемников электроэнергии.

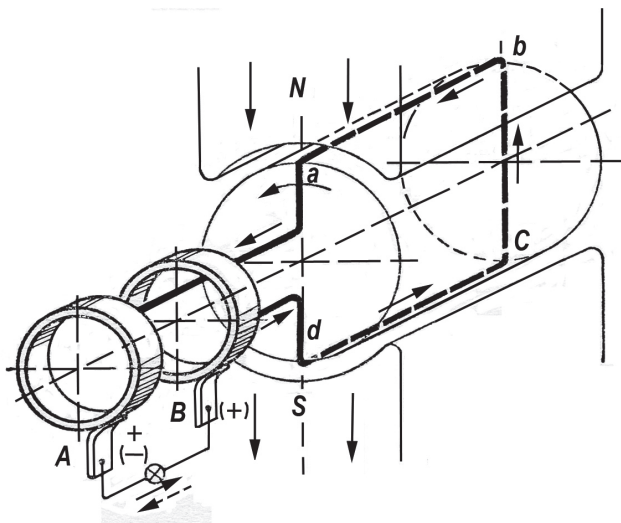


Рис. 9. Схема электрической машины переменного тока

Приведем якорь во вращение с постоянной скоростью в заданном направлении, например против часовой стрелки. В соответствии с правилом правой руки при вращении контура в нем будет индуцироваться электрический ток, изменяющий свое направление через каждые пол-оборота, так как магнитные силовые линии каждой стороной рамки будут пересекаться то в одном, то в другом направлении. Поскольку проводники ab и cd находятся в совершенно одинаковых условиях, один относительно полюса N , другой относительно полюса S , то достаточно рассмотреть процесс создания электродвижущей силы (ЭДС) только в каком-нибудь одном проводнике,

например в проводнике ab . Предположим, что по всей длине активной части проводника, т. е. той его части, которая пересекает линии магнитного поля, индукция B имеет одно и то же значение. Индукцию или плотность магнитного потока можно определить как $B = \Phi/s$, где Φ — величина магнитного потока, s — площадь, через которую проходит магнитный поток. Если v — скорость вращения проводника относительно магнитного поля, то по закону электромагнитной индукции в формулировке Фарадея мгновенное значение ЭДС, наводимой в проводнике при вращении якоря, определяется по формуле:

$$E = Blv.$$

Так как величины l (длина проводника) и v заданы, то предыдущая формула может быть переписана:

$$E = \text{const } B.$$

Таким образом, в рассматриваемых условиях характер изменения ЭДС в проводнике в зависимости от времени целиком определяется характером распределения магнитной индукции под полюсом. Отметим себе, что часть окружности якоря τ , соответствующая одному полюсу, называется *полюсным делением*. Машина, изображенная на рис. 5, имеет два полюсных деления соответственно одной паре полюсов.

Распределение магнитной индукции под полюсами реальной машины носит сложный характер. Но, пользуясь методом разложения кривых в ряд гармонических составляющих, можно выделить первую, или основную, гармонику и считать, что магнитная индукция распределена под полюсами N и S синусоидально (рис. 10). В этом случае наводимая в проводнике ЭДС изменяется во времени тоже синусоидально. Время T , за которое происходит одно полное изменение ЭДС, называется периодом ЭДС. Число периодов в секунду называется частотой и изменяется в герцах (Гц). В общем случае, когда машина имеет p пар полюсов, частота наводимой ЭДС увеличивается пропорционально p , т. е.

$$f = pn,$$

где n — частота вращения, измеряемая числом оборотов в секунду.

Рассматривая рис. 9, мы видим, что каждая из щеток соединена через кольцо только с каким-нибудь одним проводником, а именно щетка A — с проводником ab , щетка B — с проводником cd . Следовательно, на зажимах внешней цепи появляются переменные во времени напряжения, и по ней потечет переменный ток, имеющий частоту f .

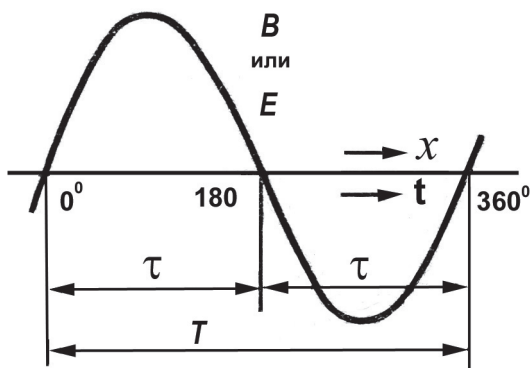


Рис. 10. Кривая изменения индукции или ЭДС во времени

На практике в генераторах применяют не один проволочный контур, а значительно большее их количество, вывод от каждого конца каждого контура присоединяется к собственной контактной пластине, отделенной от соседних пластин изолирующими промежутками. Совокупность контактных пластин и изолирующих промежутков называется *коллектором*. Коллектор в генераторе постоянного тока служит для выпрямления переменного тока, вырабатываемого рамкой. Для того чтобы электрический ток был постоянным не только

по направлению, но и по величине, коллектор делают из многих (36 и более) пластин, а проводник представляет собой много рамок или секций, выполненных в виде обмотки якоря.

Генератор, у которого имеется пропорциональная связь между частотой f переменной ЭДС, наведенной в контуре, и частотой вращения n , является *синхронным генератором*.

Основной принцип действия синхронной машины тот же, что и у машин постоянного тока, но индуцированная ЭДС не выпрямляется механически при помощи коллектора, а подводится к кольцам. В синхронных генераторах магнитное поле изменяется синхронно с изменением наведенной ЭДС. Вместо постоянных магнитов синхронная машина возбуждается постоянным током, который подводится к ее обмотке возбуждения от сети постоянного тока или от специальной машины постоянного тока, называемой *возбудителем*.

Если машина имеет два магнитных полюса, то для получения трехфазной машины (рис. 11) достаточно сделать ответвление от трех точек обмотки, отстоящих друг относительно друга на 120 градусов, и подвести их к трем кольцам; с этих колец ток снимается при помощи неподвижных щеток, полярность которых является переменной.

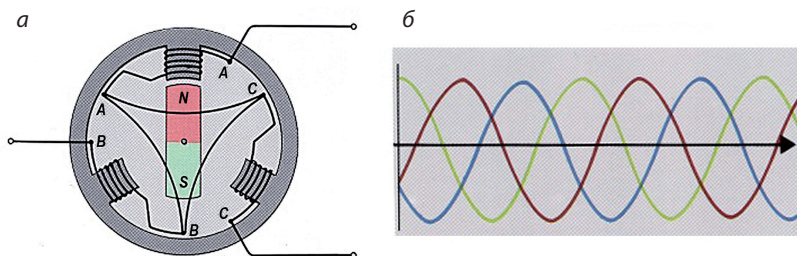


Рис. 11. Принципиальная схема трехфазного синхронного генератора (а) и выработка ЭДС тремя обмотками (б)

Однако такое конструктивное выполнение синхронной машины имеет один основной недостаток. Современные син-

хронные машины (например, турбогенераторы) конструируются на линейные напряжения до 24 кВ. При таком высоком напряжении снимать его при помощи контактов и колец, изоляция между которыми должна быть рассчитана на высокое напряжение, весьма затруднительно. Поэтому почти во всех синхронных машинах обмотку якоря (т.е. обмотку, в которой индуцируется ЭДС) помещают на неподвижной части машины, а полюсы делают вращающимися, и обмотка возбуждения питается постоянным током. Неподвижная часть синхронной машины называется *статором*, вращающаяся часть — *ротором*. Ротор иногда называют *индуктором*, потому что на нем расположена обмотка возбуждения, подключенная к вращающимся кольцам.

Так как принципиально безразлично, будет ли движущийся проводник пересекать магнитное поле или, наоборот, подвижное магнитное поле будет пересекать неподвижный проводник, то конструктивно синхронные генераторы могут быть двух видов:

- генераторы с магнитными полюсами на статоре и с проводниками на роторе, переменный ток снимается с них при помощи колец и щеток. В таком генераторе индуктор неподвижен, а якорь вращается. Однако скользящий контакт в цепи большой мощности создает значительные потери энергии, а при высоких напряжениях наличие такого контакта становится нецелесообразным. Поэтому генераторы с вращающимся якорем и неподвижными кольцами выполняют только при невысоких напряжениях (до 380/220 В) и небольших мощностях (до 15 кВт);
- генераторы, у которых магнитные полюсы помещены на роторе, а якорь — на статоре. Такие синхронные генераторы получили наиболее широкое применение в электроэнергетике.

Статор синхронного генератора собирается из отдельных железных листов, изолированных друг от друга. На внутренней поверхности статора имеются пазы, куда вкладываются

провода статорной обмотки генератора. Ротор изготавливается обычно из сплошного железа, полюсные наконечники магнитных полюсов ротора собираются из листового железа. При вращении между статором и полюсными наконечниками ротора присутствует минимальный зазор для создания минимального магнитного сопротивления при прохождении магнитного потока между статором и ротором. Геометрическая форма полюсных наконечников подбирается такой, чтобы вырабатываемый генератором ток был наиболее близок к синусоидальному.

На сердечники полюсов посажены катушки возбуждения, питаемые постоянным током. Постоянный ток подводится с помощью щеток к контактным кольцам, расположенным на валу генератора.

Все синхронные генераторы можно разделить на два вида — явнополюсные и неявнополюсные (рис. 12).

На роторе явнополюсной машины отчетливо выделяются магнитные полюсы, на которые укладывается обмотка возбуждения. Синхронные машины с явно выраженными полюсами применяют на низких частотах вращения, например в качестве гидрогенераторов.

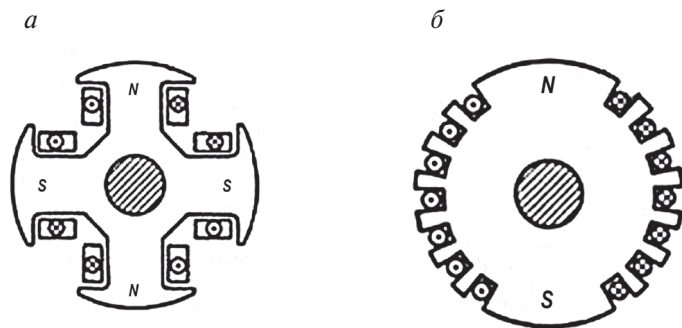


Рис. 12. Роторы явнополюсной (а) и неявнополюсной (б) машины

У неявнополюсной машины обмотка ротора равномерно уложена в пазы сердечника. Эти генераторы, как правило, ра-

ботають с высоким числом оборотов. Именно такие электрогенераторы используются в качестве турбогенераторов тепловых и атомных электростанций.

Трехфазные генераторы переменного тока могут работать автономно, т.е. непосредственно на трехфазную симметричную нагрузку: реостаты, отдельные электродвигатели, освещение и т.д.

В случае, когда такой генератор приводится в движение двигателем — дизелем или турбиной, результат преобразования механической энергии в электрическую можно продемонстрировать с помощью формулы

$$P_{\text{эл}} = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos\varphi .$$

Здесь $P_{\text{эл}}$ — мощность трехфазной системы, Вт; U_{ϕ} — фазное напряжение, В; I_{ϕ} — фазный ток, А; φ — угол сдвига фаз напряжения и тока.

В практике турбогенераторы редко работают на автономную нагрузку вследствие их большой мощности. В основном они работают в энергосистеме, параллельно друг с другом. Рассмотрим подробнее процесс преобразования энергии при работе турбогенератора на электрическую сеть.

Обмотка возбуждения, укладываемая в пазы ротора, через два кольца питается от источника постоянного тока (возбудителя) и образует двухполюсную магнитную систему. Магнитодвижущая сила (МДС) равна произведению силы тока на количество витков обмотки $F_{\text{в}} = I_{\text{в}} W_{\text{в}}$. Через магнитодвижущую силу МДС обмотка возбуждает постоянный магнитный поток:

$$\Phi_{\text{в}} = \frac{F_{\text{в}}}{R_{\text{м}}} .$$

Здесь $I_{\text{в}}$ — ток возбуждения; $W_{\text{в}}$ — число витков обмотки возбуждения; $R_{\text{м}}$ — магнитное сопротивление участков магнитопровода, по которому замыкается магнитный поток (железо статора и ротора, воздушный зазор между статором и ротором).

При вращении ротора постоянный магнитный поток ротора воспринимается проводниками трехфазной обмотки статора как переменный, вращающийся с определенной скоростью относительно неподвижных проводников обмотки статора, и он наводит в каждом из проводников переменную электродвижущую силу (ЭДС). Именно этот процесс и обессмертил имя Майкла Фарадея, открывшего закон электромагнитной индукции. Мгновенное значение ЭДС проводника равно

$$E_{np} = - \frac{d\Phi}{dt},$$

где $\frac{d\Phi}{dt}$ — скорость изменения магнитного потока.

В обмотке статора проводники по определенным правилам образуют последовательно катушки, катушечные группы и наконец фазы. При этом ЭДС фаз синусоидальны и равны по величине (ввиду того, что число витков в каждой фазе одинаково), а также сдвинуты во времени на 120 электрических градусов, поскольку фазы обмотки статора укладываются определенным образом — так, что они сдвинуты в пространстве друг относительно друга на 120 геометрических градусов.

М. О. Доливо-Добровольский предложил и обосновал наиболее приемлемую и перспективную по всем энергетическим показателям трехфазную систему. Важным достижением Доливо-Добровольского явилось также то, что он отказался от выполнения асинхронного двигателя с выступающими полюсами, а сделал обмотку статора распределенной по всей окружности. В результате уменьшилось магнитное рассеяние по сравнению с двигателем Тесла. Вскоре Доливо-Добровольский заменил кольцевой тип обмотки статора барабанным. Так асинхронный двигатель приобрел современный вид.

Фазы обмотки обычно соединяются по схеме «звезда», как показано на рис. 13. Концы всех трех фаз объединяют в общую точку, называемую нейтральной (нулевой). Если от генератора

отводят только три провода — 1, 2, 3, то такую систему называют *трехфазной трехпроводной*. Если отводят также четвертый, *нейтральный*, провод, то систему называют *трехфазной четырехпроводной*. Нейтральную точку генератора, а следовательно, и нейтральный провод надежно заземляют. Если обмотку статора включить на симметричную нагрузку (например, активное сопротивление), то в каждой фазе потечет переменный синусоидальный ток, создавая переменную синусоидальную МДС. МДС каждой фазы одинаковы, имеют пульсирующий характер и сдвинуты в пространстве и во времени на угол 120 градусов.

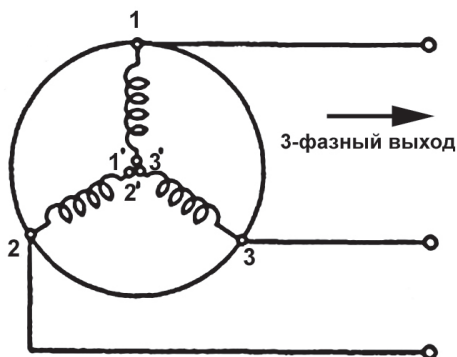


Рис. 13. Соединение обмоток генератора «звездой»

Еще из курса физики нам известно, что любое пульсирующее поле можно разложить на два поля, вращающихся в разные стороны (с амплитудой, равной $1/2$ от амплитуды пульсирующего поля). При сложении трех пульсирующих МДС обмотки статора отрицательные полуволны в сумме дадут ноль (это доказывается достаточно просто, даже тригонометрическим путем). Положительные полуволны МДС в сумме образуют результирующую волну с амплитудой, равной $3/2$ амплитуды пульсирующей МДС фазы, и вращающуюся в ту же сторону, что и ротор. Вращающаяся результирующая волна МДС создает вращающийся магнитный поток, скорость которого будет

равна скорости ротора, т.е. *магнитные потоки, созданные ротором и статором, будут неподвижны друг относительно друга и будут взаимодействовать*. Результатом взаимодействия будут силы, приложенные к зубцам магнитопровода статора (момент статора), а поскольку статор неподвижен, то по третьему закону И. Ньютона (помните школьную формулировку «действие равно противодействию»?) этот момент воспринимается как тормозной по отношению к моменту турбины. Еще раз подчеркнем, что все изложенное выше, касающееся в основном образования вращающихся магнитных полей статора и ротора, возможно только при синусоидальных значениях ЭДС, напряжения, тока, МДС и магнитных потоков. Для этого в конструкции ротора и статора и в схемах обмоток ротора и статора предусмотрены специальные меры с целью «культивирования» синусоидальной первой гармонической составляющей. В действительности же, кроме первой (основной) гармонической составляющей, присутствуют высшие гармонические (3-я, 5-я, 7-я и т.д.), с которыми успешно борются.

Особенностью работы турбогенератора является необходимость поддерживать постоянными величину напряжения и частоту вращения независимо от мощности турбины, приводящей в движение ротор турбогенератора. Если бы это условие жестко не контролировалось и не соблюдалось неукоснительно, невозможно была бы работа промышленных и бытовых устройств. У нас бы сгорели наши компьютеры, телевизоры и холодильники!

Дело в том, что обычно на электростанции параллельно работают несколько синхронных генераторов. Это увеличивает общую мощность электростанции и повышает надежность электроснабжения потребителей. Электрические станции, в свою очередь, объединяют для параллельной работы в мощные энергосистемы. Таким образом, для синхронного генератора, установленного на электрической станции, типичным является режим работы на сеть большой мощности, по сравнению с которой мощность каждого генератора очень мала. В этом случае с большой степенью точности можно принять, что генератор

работает параллельно с сетью бесконечно большой мощности, то есть что напряжение сети U_c и ее частота f_c являются постоянными, не зависящими от нагрузки данного генератора.

При увеличении расхода пара в турбину растет механический момент на ее валу (момент турбины). Но генератор не может изменить частоту вращения, а также и частоту напряжений и токов в системе ввиду ее большой мощности. Что же происходит с генератором, если изменяется мощность турбины?

Посмотрим, как взаимодействуют магнитные потоки, созданные ротором и статором. На рис. 14, а показано взаимодействие магнитных потоков на холостом ходу — между ротором и статором существуют только силы притяжения f , направленные радиально, и электромагнитный момент M равен нулю.

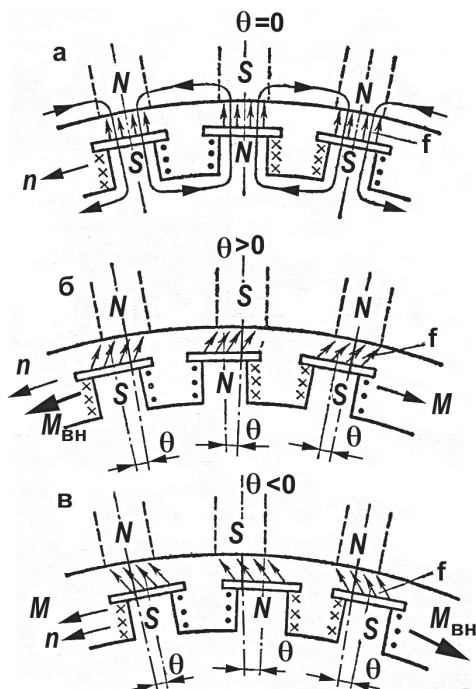


Рис. 14. Картина взаимодействия магнитных потоков в синхронном генераторе

Когда вращающий момент на валу турбины возрастает, оси магнитных полюсов ротора и статора смещаются, и между ними возникает угол θ , который называется углом нагрузки.

Если говорить строго, под углом нагрузки понимают угол между магнитной осью полюса и осью результирующего магнитного поля статора или между вектором ЭДС генератора и вектором напряжения U . Раньше этот угол назывался углом вылета (или выбега) ротора.

При $\theta > 0$ (генераторный режим) ось магнитного потока возбуждения $\Phi_{\text{в}}$ (ось полюсов ротора) под действием вращающего момента турбины $M_{\text{вн}}$ опережает ось суммарного потока генератора $\Sigma\Phi$ на угол θ (рис. 14, б). Вследствие этого электромагнитные силы, возникающие между ротором и статором, образуют тангенциальные, или касательные, составляющие, которые создают электромагнитный момент M . При этом ротор генератора буквально (даже в пространстве) начинает «уходить» вперед до тех пор, пока момент генератора не сравняется с моментом турбины. Максимум момента соответствует значению $\theta = 90$ град, когда ось полюсов ротора расположена между осями «полюсов» суммарного потока $\Sigma\Phi$.

При $\theta < 0$ (двигательный режим) ось потока возбуждения $\Phi_{\text{в}}$ под действием тормозящего момента нагрузки $M_{\text{вн}}$ отстает от оси суммарного потока (рис. 14, в), вследствие чего тангенциальные составляющие электромагнитных сил, возникающие между ротором и статором, создают электромагнитный момент M .

Угловая характеристика синхронной машины (рис. 15) — зависимость величины электромагнитного момента от угла нагрузки — имеет большое значение для оценки ее *статической устойчивости* и степени перегружаемости. Под *статической устойчивостью синхронной машины*, работающей параллельно с сетью, понимают ее способность сохранять синхронное вращение (т. е. условие $n = \text{const}$) при изменении внешнего вращающего или тормозящего момента $M_{\text{вн}}$, приложенного к ее валу. *Статическая устойчивость обеспечивается только при углах θ , соответствующих $M < M_{\text{max}}$.*

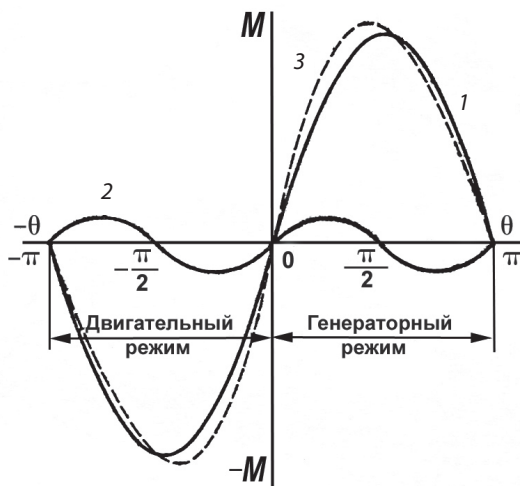


Рис. 15. Угловая характеристика явнополюсной (1) и неявнополюсной (2) машины

Нарушение условий синхронизации или выпадение из синхронизма является аварийным режимом, так как оно сопровождается прохождением по обмотке якоря больших токов.

Устойчивость генератора при заданном значении активной мощности, отдаваемой в сеть, зависит от тока возбуждения. При увеличении тока возбуждения возрастает ЭДС генератора, а следовательно, и момент M_{\max} ; при этом увеличивается устойчивость машины.

В современных синхронных генераторах широко применяют автоматическое регулирование тока возбуждения для стабилизации напряжения при изменении нагрузки и повышения статической и динамической устойчивости. Для этого генераторы большой мощности снабжают регуляторами сильного действия, которые реагируют на отклонение напряжения U от установленного значения.

.....

Мы познакомились с принципиальным устройством генератора вообще и турбогенератора в частности. Однако для того и существуют инженеры, чтобы воплощать теоретические принципы в конструкции реальных машин.

Про раму с током все уже понятно, а вот какие турбогенераторы работают на электрических станциях сегодня? Об этом мы узнаем в следующей главе...

Студенты — остроумные люди

Экзамен.

Преподаватель:

— Как устроена трехфазная система электрического тока?

Студент:

— Электричество передается по трем проводам.

Преподаватель:

— А можно поподробнее?

Студент:

— По первому проводу передается напряжение, по второму ток, а по третьему косинус фи.

*

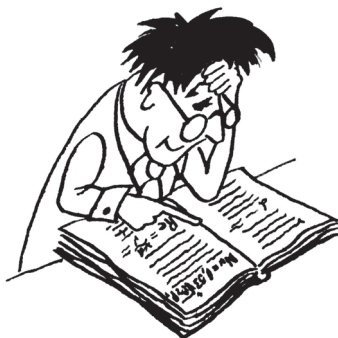
Вопрос на лекции.

— Вот вы говорите, профессор, что график переменного тока — синусоида. Так?

— Так!

— А ведь провода-то ПРЯМЫЕ!

— Э-э-э... Так синусоида-то ма-а-аленькая!



*

Студенты электрик, химик, механик и программист едут вместе в машине. Вдруг заглох мотор.

Электрик говорит: «Наверное, аккумулятор сел».

Химик говорит: «Нет, скорее всего, не тот бензин».

Механик: «Я думаю, что это передача не работает».

Программист: «Может, выйдем из машины и зайдем обратно?»

*

Электрик — электрику:

«Дай в долг 200 рублей. Ну, для ровного счета 220 ...»

ГЛАВА 3. КАКОЙ ОН – РЕАЛЬНЫЙ ТУРБОГЕНЕРАТОР?

У чтобы стать реальным, работающим устройством, виток провода и пара магнитных полюсов должны воплотиться в конструкцию из стали, сплавов и изоляционных материалов, содержащую множество узлов разного назначения.

Сложность конструкции электрических машин обусловлена различными факторами:

- родом тока (постоянный или переменный);
- сочетанием различных материалов (электротехнической и конструкционной сталей, цветных металлов, изоляционных материалов и т. д.);
- широким диапазоном мощностей (от долей ватта до сотен мегаватт);
- различием частот вращения подвижных узлов (от нескольких оборотов в минуту до сотен тысяч).

В электромашиностроении применяют различные материалы — магнитные, проводниковые и изоляционные. *Магнитопроводы* турбогенераторов изготавливаются из листовой углеродистой и электротехнической стали, а также из стального литья. Главной легирующей присадкой электротехнической стали является кремний, наличие которого уменьшает магнитные потери. Содержание кремния в стали составляет 0,4—4,8%, и чем оно выше, тем ниже потери. *Полюсы* синхронных машин собирают из листов низкоуглеродистой конструкционной стали толщиной 1—2 мм или электротехнической стали. Для изготовления *корпусов* используют листо-

вую низколегированную магнитно-мягкую сталь, так как корпуса являются частью магнитопровода. Стальное литье применяют для изготовления станин и роторов синхронных машин. Валы машин выполняют из высокопрочных конструкционных сталей с добавкой хрома, никеля и т.д. Особенно сложно изготовить роторы турбогенераторов, в которых сталь одновременно должна обладать и высокой прочностью, и хорошей магнитной проницаемостью.

В качестве *проводниковых материалов* в электромашиностроении применяют медь и алюминий. Медь значительно дороже алюминия, однако ее используют для изготовления обмоток чаще, чем алюминий, так как она обладает более высокой электропроводностью (примерно в 1,6 раза), а это позволяет сократить габариты машин. Для изготовления круглых и прямоугольных проводов обмоток генераторов применяют проводниковую медь высокой чистоты, получаемую в электролитических ваннах; она отличается весьма низким содержанием посторонних примесей и содержит 99,95 % меди. Для контактных колец и коллектора в качестве токопроводящего материала кроме меди применяют бронзу и даже сталь (для контактных колец), так как для этих деталей важна не только электропроводность, но и высокая механическая прочность.

Особые требования предъявляются к *изоляции* — она должна обладать высокой нагревостойкостью, электрической и механической прочностью, влагостойкостью и эластичностью, иметь хорошую теплопроводность. Нагревостойкость изоляции является основным требованием, определяющим надежность работы и срок службы электрической машины, который обычно составляет 15–20 лет. При нагреве изоляции возникают электрохимические и термические процессы, приводящие к ее старению, т.е. к потере изолирующих свойств и механической прочности. Наибольшей нагревостойкостью обладают стекловолоконные и слюдяные материалы, содержащие кремнийорганические связующие и пропитывающие составы, эмалевая изоляция проводов на основе кремнийорганических лаков и синтетические пленки. Они отличаются также высокой электрической и механической прочностью и влагостойкостью.

В электрических машинах широко используют обмоточные провода с эмалевой, волокнистой и комбинированной изоляцией. Класс нагревостойкости такой изоляции зависит от химического состава эмалевого лака, рода волокнистого материала и подклеивающего состава. Пропитывающими составами служат битумно-масляно-смоляные лаки на основе природных и синтетических смол.

Главным фактором, определяющим особенности конструкции турбогенераторов, является высокая частота вращения, вызывающая большие механические напряжения в роторе. Поэтому турбогенераторы выполняются горизонтальными с цельнокованым ротором, изготовленным из высоколегированной стали, и с относительно небольшим наружным диаметром, но большой длиной активного железа статора. Устройство турбогенератора и его основные узлы показаны на рис. 16.

В качестве примера на рис. 17 показан продольный разрез турбогенератора мощностью 12 МВт с воздушным охлаждением.

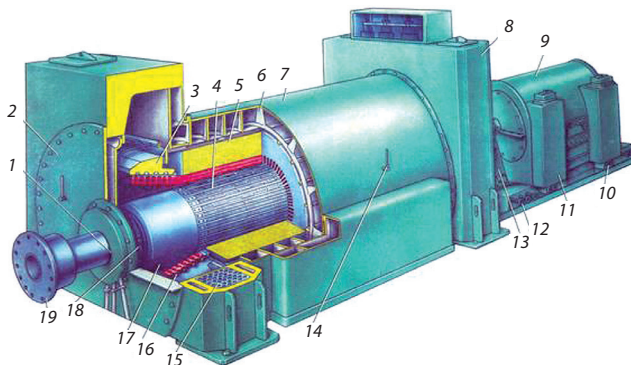


Рис. 16. Турбогенератор:

1 — уплотнения на валу ротора; 2 — торцевой щит; 3 — кронштейн крепления; 4 — ротор; 5 — магнитопровод статора; 6 — детали крепления магнитопровода к корпусу; 7 — корпус турбогенератора; 8 — охладитель турбогенератора; 9 — возбудитель; 10 — патрубок подвода воды к охладителю; 11 — охладитель возбудителя; 12 — маслопровод к подшипнику; 13 — стойка подшипника; 14 — термометр; 15 — трубы для циркуляции воды в охладителе; 16 — бандажные кольца обмотки статора; 17 — бандажное кольцо ротора; 18 — центробежный вентилятор; 19 — фланец для соединения вала ротора с турбиной

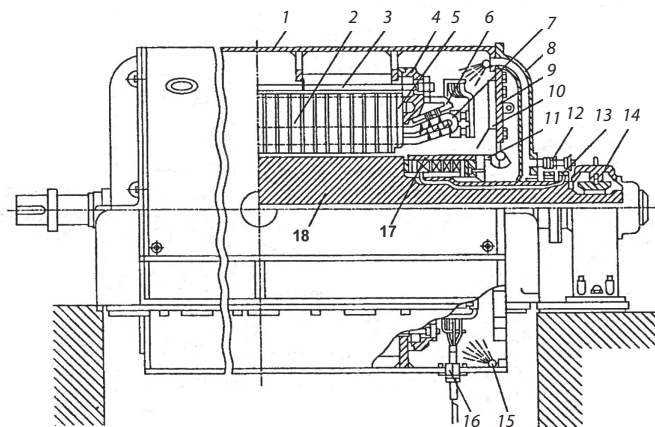


Рис. 17. Турбогенератор мощностью 12 МВт с воздушным охлаждением

Конструкция турбогенератора включает в себя сварной корпус 1, имеющий опорные лапы. Корпус прикреплен к фундаментной плите, которая анкерными болтами соединяется с фундаментом. Сердечник статора 2 набран из шихтованных сегментов электротехнической стали толщиной 0,5 мм (в последнее время применяют толщину 0,35 для снижения потерь стали). Сегменты сердечника спрессованы в сварном корпусе и стянуты с помощью стяжных шпилек 3, нажимных колец 4 и нажимных пальцев 5. Лобовые части обмотки статора 7 притянуты к бандажным кольцам 6 для предохранения обмотки от деформации из-за динамических усилий при коротких замыканиях.

Начала фаз обмотки соединены с выводными шинами 16. Сердечник состоит из отдельных пакетов, между которыми имеются вентиляционные каналы. С торцов корпус статора закрыт внутренними 9 и наружными 8 щитами, которые в центральной части имеют отверстия для прохода вала ротора. К внутреннему щиту прикреплен диффузор 10 с разделитель-

ными перегородками, который необходим для превращения скоростного динамического напора воздушной струи, идущей от вентилятора 11, в статический напор. В роторе 18, изготовленном из цельной поковки, профрезерованы пазы, в которые уложена обмотка возбуждения. Выводы обмотки возбуждения соединены с контактными кольцами 13. Ток в обмотку возбуждения подводится с помощью щеточного устройства 12.

Система возбуждения турбогенератора может быть электромашинного типа и состоять из генератора постоянного тока или генератора переменного тока, включенного через выпрямитель, либо статического типа и состоять из преобразователя частоты. Обмотка возбуждения в пазах ротора удерживается металлическими клиньями, а лобовые части — стальными бандажными кольцами 17. Турбогенератор имеет два подшипника 14 скользящего трения с принудительной подачей масла от масляного насоса.

Для разрыва цепи подшипниковых токов подшипник со стороны возбудителя электрически изолирован от фундаментной плиты прокладками. Это делается для того, чтобы электрокоррозия от этих токов не повредила поверхности вкладышей и шейки вала. В корпусе статора укреплены трубопроводы системы пожаротушения 15 для подачи внутрь машины в случае необходимости углекислого газа или пара.

Турбогенераторы, предназначенные для установки на тепловых электростанциях обычного типа, работают, как правило, при максимально возможной частоте вращения 3000 об/мин. Эти турбогенераторы имеют два полюса, что позволяет существенно уменьшить габариты и массу самой машины, а также и паровой турбины. На атомных электростанциях реакторы вырабатывают пар с относительно низкими температурой и давлением. Поэтому для них более экономичными являются турбины и турбогенераторы с частотой вращения 1500 об/мин, имеющие четыре полюса. Однако из-за этого значительно увеличивается диаметр ротора, наиболее дорогой части турбогенератора — при одинаковой мощности приблизительно

в $\sqrt{2}$ раза. Так, в турбогенераторе мощностью 1000 МВт на 1500 об/мин типа ТВВ-1000 производства ЛПЭО «Электро-сила» масса поковки ротора составляет 150 т против 91 т у генератора той же мощности на 3000 об/мин. Четырехполюсные турбогенераторы характеризуются меньшими механическими нагрузками (механические напряжения в сечениях ротора, вибрации сердечника и обмотки статора) и, таким образом, при прочих равных условиях более надежны.

По мере роста мощности турбогенераторов конструкции их заметно усложняются, однако основные узлы остаются те же. Увеличение мощности и обусловленное этим развитие турбогенераторостроения тесно связано с прогрессом в системах охлаждения.

Почему так важно иметь эффективную систему охлаждения? Во время работы в генераторе возникают потери энергии, превращающиеся в теплоту и нагревающие его элементы. Представьте себе, что если КПД турбогенератора — одной из самых эффективных в технике машин — равен 99 %, то значит, «внутри» у генератора-миллионника остается ни много ни мало 10000 кВт. Ощутить эти мифические киловатты несложно: это как если бы в комнате площадью 18—20 кв. м (именно такую площадь занимает генератор подобной мощности) установили 10000 всем знакомых одноконфорочных электроплиток и одновременно все их включили в сеть. Чувствуете, как жарко стало в помещении? Вот эту теплоту и должна отвести «правильная» система охлаждения.

Предельный нагрев генераторов лимитируется изоляцией обмоток статора и ротора, так как под воздействием теплоты происходит ухудшение ее электроизоляционных свойств и понижение механической прочности и эластичности. Изоляция высыхает, крошится и перестает выполнять свои функции.

В первой главе мы уже говорили, что первые турбогенераторы охлаждались самым простым способом — воздушным. Впоследствии для охлаждения рабочих частей генератора на по-

мощь воздуху пришли вода и водород. Сегодня подавляющее большинство турбогенераторов охлаждается водородно-водяным способом. Вода наиболее эффективна для охлаждения из-за своей высокой теплопроводности и относительно меньших затрат на прогонку через систему охлаждения. Но инженеры никак не могли справиться с конструктивными трудностями подвода жидкого охладителя в движущуюся часть генератора, поэтому долгое время в мировой практике вода применялась только для охлаждения статора.

В зависимости от применяемой в системах охлаждающей среды различают турбогенераторы:

- с *газовым* (воздушным или водородным) охлаждением;
- с *жидкостным* (водяным или масляным) охлаждением;
- со *смешанным типом* охлаждения. В этом случае обмотка возбуждения имеет газовое охлаждение, а обмотка якоря — жидкостное.



Рис. 18. Турбогенератор Калининской АЭС мощностью 1100 МВт

По принципу охлаждения различают такие виды турбогенераторов:

- с непосредственным охлаждением проводников обмотки;
- с косвенным охлаждением (отвод теплоты через основную изоляцию);
- со смешанным охлаждением. В этом случае обмотка возбуждения имеет непосредственное охлаждение проводников, а обмотка якоря — косвенное.

При косвенном охлаждении охлаждающий газ (воздух или водород) с помощью вентиляторов, встроенных в торцы ротора, подается внутрь генератора и прогоняется через немагнитный зазор и вентиляционные каналы. При этом охлаждающий газ не соприкасается с проводниками обмоток статора и ротора, и тепло, выделяемое ими, передается газу через значительный тепловой барьер — изоляцию обмоток. При непосредственном охлаждении охлаждающее вещество (газ или жидкость) соприкасается с проводниками обмоток генератора, минуя изоляцию и сталь зубцов, т. е. непосредственно.

В конструкциях серийных турбогенераторов в настоящее время применяются следующие типы конфигурации систем охлаждения:

косвенное воздушное охлаждение обмоток индуктора (ротора) и якоря (тип Т);

- косвенное водородное охлаждение обмоток индуктора и якоря (тип ТВ);

- непосредственное охлаждение обмотки возбуждения и косвенное охлаждение обмотки якоря водородом (тип ТВФ);

- непосредственное охлаждение обмотки возбуждения якоря водородом (тип ТГВ);

- непосредственное охлаждение обмотки возбуждения водородом, а якоря — водой (тип ТВВ);

- непосредственное охлаждение обмоток машины водой (тип ТЗВ — «три воды», об этом говорилось в первой главе).

На рис. 19 представлены рекомендуемые ЛПЭО «Электро-сила» зоны применимости тех или иных систем охлаждения в зависимости от мощности турбогенератора P_n .

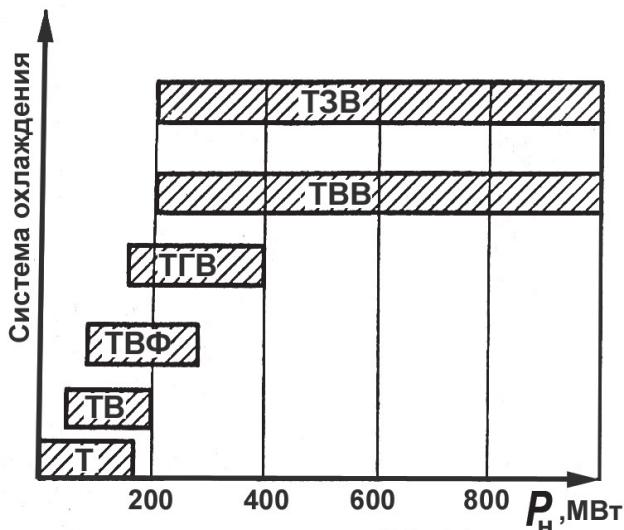


Рис. 19. Рекомендуемые системы охлаждения турбогенераторов

Существуют два вида систем воздушного охлаждения — проточная и замкнутая. Проточную систему охлаждения применяют редко и лишь в турбогенераторах мощностью до 2 МВ·А. При этом через генератор прогоняется воздух из машинного зала, который быстро загрязняет изоляцию обмоток статора и ротора, что в конечном счете сокращает срок службы генератора. При замкнутой системе охлаждения один и тот же объем воздуха циркулирует по замкнутому контуру.

Система охлаждения турбогенераторов всегда замкнутая, то есть охлаждающий агент циркулирует внутри генератора, отводя теплоту от тех или иных частей машины (обмоток, сердечника статора, подшипников), при этом сама охлаждающая

среда нагревается. Необходимость замкнутой системы диктуется жесткими требованиями безопасности и состояния окружающей среды. В замкнутой системе охлаждения устанавливаются специальные теплообменники, в которых с помощью технической воды утилизируется отведенная теплота, а температура охлаждающего агента понижается.

На рис. 20 показан продольный разрез турбогенератора мощностью 300 МВт, частотой вращения 3000 об/мин с водородно-водяным непосредственным охлаждением. Турбогенератор имеет непосредственное охлаждение обмотки статора дистиллированной водой, непосредственное форсированное охлаждение обмотки ротора водородом, а внешней поверхности ротора и сердечника статора — водородом. Статор турбогенератора разъемный. Корпус статора выполнен из трех частей: одной центральной и двух концевых. Центральная часть корпуса статора газонепроницаемая. Корпус выполнен неразъемным и имеет внутри поперечные кольца жесткости для крепления сердечника. Сердечник статора собран на клиньях из сегментов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, покрытых изолирующим лаком, и вдоль оси разделен вентиляционными каналами на пакеты. Клинья сердечника статора приварены к поперечным кольцам корпуса статора. В пазы сердечника статора уложены стержни статорной обмотки. Начала и концы обмотки выведены наружу через выводы. Обмотка статора трехфазная.

Корпус турбогенератора заполнен водородом под давлением. Охлаждающий водород циркулирует под действием двух осевых вентиляторов, установленных на валу ротора, и охлаждается в газоохладителях, встроенных в корпус генератора. Турбогенератор оснащен четырьмя газоохладителями, расположенными вертикально, по два в каждой концевой части. Циркуляция технической воды в газоохладителях осуществляется насосами, расположенными вне генератора.

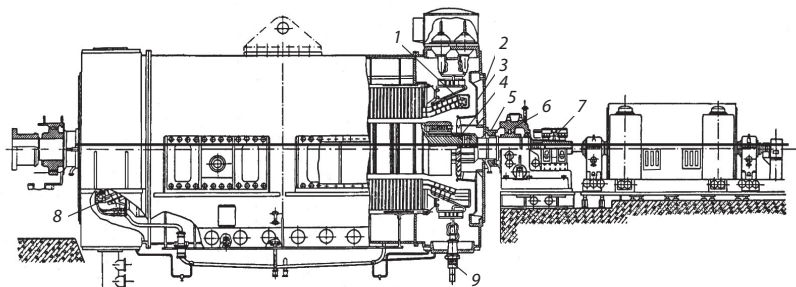


Рис. 20. Продольный разрез турбогенератора 300 МВт
с водородно-водяным охлаждением:

1 — статор; 2 — щит наружный; 3 — щит вентилятора; 4 — ротор;
5 — уплотнение вала ротора; 6 — подшипник; 7 — щеточный
аппарат; 8 — газоохладитель; 9 — вывод концевой

Ротор изготовлен из цельной поковки специальной высококачественной стали. В бочке ротора выфрезерованы пазы, в которые уложена обмотка возбуждения из полосовой меди с присадкой серебра. Ее охлаждение осуществляется непосредственно водородом по схеме самовентилиации с забором газа из зазора машины. Для предотвращения выхода водорода из корпуса статора по валу ротора на наружных щитах установлены масляные уплотнения вала.

Контактные кольца установлены на валу ротора за подшипником со стороны возбудителя. Щетки и контактные кольца охлаждаются вентилятором.

Турбогенератор имеет массивные торцевые щиты с встроенным узлом подшипников.

Максимальная мощность турбогенераторов с водородно-водяным охлаждением, достигнутая объединением «Электросила», — 1200 МВт. Турбогенератор мощностью 1200 МВт на 3000 об/мин показан на рис. 21.

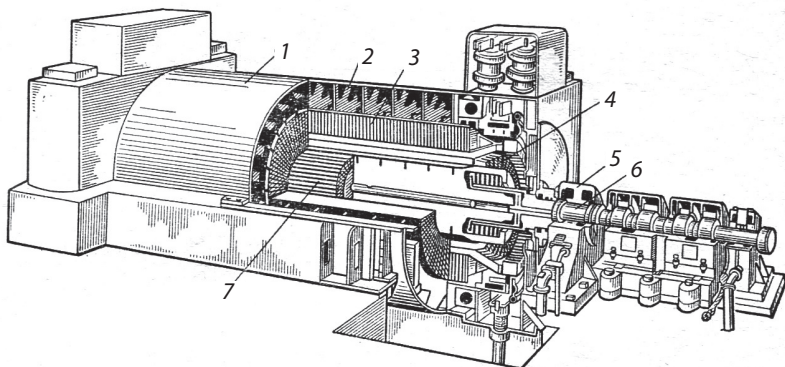


Рис. 21. Общий вид турбогенератора ТБВ-1200—2:
1 — корпус; 2 — камеры для сбора и распределения охлаждающего газа;
3 — статор; 4 — обмотка статора; 5 — подшипник; 6 — вал; 7 — ротор

А на рис. 22 показан турбогенератор такой же мощности с водородным охлаждением, изготовленный фирмой *Brown Boveri* для работы на атомной электростанции.



Рис. 22. Турбогенератор ВВС мощностью 1200 МВт

Как известно, водород горюч, и если он оказывается на свободе, дело плохо. Летучий газ мгновенно превращает машинный зал, в котором работает генератор, в огромную горелку. И сила пламени у этой горелки такова, что стальные конструкции, поддерживающие крышу машинного зала, сгорают за очень короткое время подобно веткам в полыхающем костре. Что такое авария на электростанции, долго объяснять не надо. Помимо огромных материальных потерь и загрязнения окружающей среды, это зачастую и человеческие жертвы.

Крупные аварии на электростанциях заставили конструкторов «Электросилы» задуматься над проблемой создания турбогенератора без водорода. Ведь генератор, внутри которого присутствуют только вода и воздух, загореться практически не может. А значит, он не только надежнее и безопаснее, чем водо-водородный генератор, но к тому же и дешевле: около 30 % стоимости турбогенератора с водородно-водяным охлаждением составляет стоимость средств пожаротушения, которыми он оснащается в обязательном порядке. Турбогенератору с полным водяным охлаждением такая система не нужна, ведь в нем отсутствует не только водород, но и масляные уплотнители вала, которые в водо-водородных генераторах удерживают водород внутри машины. Даже в качестве смазки для такого генератора можно применять и турбинное масло, и негорючую жидкость.

В 2011 г. объединение «Силовые машины», в которое входит и «Электросила», изготовило и успешно провело испытания уникального быстроходного турбогенератора с полным водяным охлаждением мощностью 1200 МВт, предназначенного для первого энергоблока Нововоронежской АЭС-2 (НВАЭС-2). Быстроходные паровые турбины и турбогенераторы мощностью 1200 МВт для АЭС — это новые разработки «Силовых машин» для атомных энергоблоков нового поколения с повышенной надежностью и безопасностью. Принципиально новые конструктивные решения турбогенераторов были отработаны специалистами петербургского энергомашиностроительного концерна на машинах мощностью 800 МВт, эксплуатируемых

в течение длительного времени на Рязанской и Пермской ГРЭС, а также на турбогенераторе мощностью 890 МВт, изготовленном в 2010 г. для 4-го энергоблока Белоярской АЭС.

Турбогенераторы ТЗВ-1200–2 (рис. 23) являются развитием серии турбогенераторов с полным водяным охлаждением — высокоэффективных взрыво-и пожаробезопасных турбогенераторов для атомных электростанций, не имеющих аналогов в мировом атомном энергомашиностроении.



Рис. 23. Сборка турбогенератора ТЗВ-1200-2

Отечественные конструкторы предложили оригинальную самонапорную систему охлаждения обмоток ротора, отказавшись от разрабатываемой западными компаниями напорной схемы (когда охлаждающая вода подается в ротор под давлением). В самонапорной системе ротор генератора работает как центробежный насос, он засасывает воду, подаваемую свободной струей из неподвижного коллектора, и свободно сбрасывает ее в сливную камеру. В этой схеме нет места сложной механической и гидравлической системе подачи воды, нет сотен стальных и изоляционных трубок и уплотнений, из-за которых зарубежные конструкции и сейчас недостаточно надежны.

В серию ТВМ — турбогенераторов с масляным охлаждением — входят турбогенераторы мощностью 300 и 500 МВт (рис. 24). Обмотки и сердечник статора этих турбогенераторов имеют масляное охлаждение, а ротор охлаждается водой.

Статор турбогенераторов заполнен изоляционным маслом, объем которого ограничивается корпусом, торцевыми щитами и изоляционным цилиндром, заведенным в расточку статора. Сердечник статора выполнен в виде одного сплошного пакета, набранного из штампованных сегментов электротехнической стали. Обмотка статора — стержневая, двухслойная с бумажно-масляной изоляцией. Обмотка охлаждается маслом, протекающим внутри полых проводников (турбогенератор мощностью 300 МВт) или по шелевому каналу в стержне (турбогенератор мощностью 500 МВт).

Ротор изготавливается из цельной поковки высокопрочной легированной стали. Катушки обмотки ротора выполнены из полых медных проводников. Ротор охлаждается конденсатом, циркулирующим по каналам проводников. В турбогенераторе мощностью 500 МВт применено жидкостное охлаждение поверхности бочки ротора, осуществляемое с помощью конденсата, протекающего по трубкам, расположенным в зубах ротора.

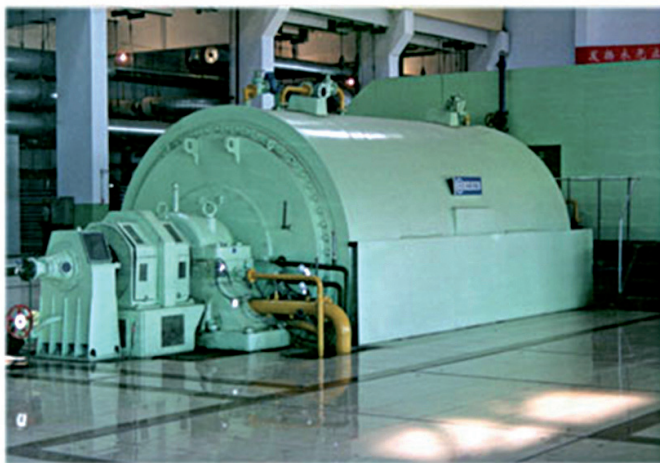


Рис. 24. Турбогенератор ТВМ-160 производства НПО «ЭЛСИБ»

Самым важным показателем совершенства конструкции турбогенератора является его надежность в эксплуатации.

Большой проблемой при работе генераторов с водородным охлаждением является борьба с утечкой водорода. Перед вводом в эксплуатацию таких машин или после их капитального ремонта в обязательном порядке должна быть осуществлена проверка генератора, а также самой системы водородного охлаждения на ее газовую плотность. Потери водорода в сутки не должны превышать более 10 % от общего его количества в агрегате. А стоячая его утечка не должна превышать 5 %. Допустимая температура охлаждающего водорода составляет 40 °С. Снижать ее менее 20 °С нельзя. Для нормальной и бесперебойной работы турбогенератора, температура охлаждающей жидкости, находящейся в газоохладителе, должна составлять 33 °С. Минимальное ее значение составляет 15 °С.

Вибрационное состояние турбогенератора, а именно амплитуда и частота вибрации его вращающихся частей, является одним из основных параметров, которые отвечают за безопасность и надежность во время эксплуатации. Вибрация может быть вызвана неуравновешенностью вращающихся узлов турбогенератора, нарушением конструкции подшипников, несимметричностью воздушных зазоров, замыканием витков в обмотках, нарушением изоляции обмоток и т. д.

Продолжительная и безаварийная эксплуатация турбогенераторов обеспечивается в том случае, когда они включаются в работу при помощи метода «точной синхронизации», то есть в момент точного совпадения с параметрами сети величин частоты вращения, напряжения и фазы у турбогенератора. Практически при синхронизации генератора сначала устанавливают номинальную частоту вращения ротора, что обеспечивает приближенное равенство частот, а затем, регулируя ток возбуждения, добиваются равенства напряжения. Совпадение по фазе векторов напряжений сети и генератора контролируется специальными приборами — синхроноскопами. На электрических станциях обычно используют автомати-

ческие приборы для синхронизации генераторов без участия обслуживающего персонала.

.....

Мы попытались лишь в общих чертах показать, как устроен современный турбогенератор. Конечно, конструкции турбогенераторов постоянно совершенствуются. Технический прогресс открывает новые перспективы и пути развития энергетики и энергомашиностроения. О том, что нас ждет в будущем, расскажем в следующей главе. Будет интересно!

Студенты — остроумные люди

Электрик ученику:

— Вань, возьми какой-нибудь из тех двух проводов.

— Взял.

— Ты ничего не чувствуешь?

— Ничего.

— Тогда другой провод не трогай: там 220 вольт.

*

Абитуриент сдает вступительный экзамен в институт.

Экзаменатор: «Объясните, почему крутится электромотор?»

Абитуриент: «Потому что электричество».

Экзаменатор: «Что за ответ? Отчего же тогда электрический утюг не крутится?»

Абитуриент: «Потому что не круглый».



Экзаменатор: «Ну, допустим, а электроплитка? Круглая? Почему она не крутится?»

Абитуриент: «Потому что шершавая, трение...»

Экзаменатор: «Ну, допустим. А лампочка! Электрическая! Круглая! Гладкая! Почему тогда лампочка не крутится?»

Абитуриент: «А вот лампочка как раз и крутится!»

Экзаменатор: «Не понял...»

Абитуриент: «Когда вы ее в патрон вставляете, что вы делаете? Правильно, вы ее крутите!»

Экзаменатор: «Ну да, в самом деле, кручу... Да! Но ведь это я ее кручу, а не она сама!»

Абитуриент: «Ну, знаете ли, само по себе вообще ничего не крутится! Вот, например, электромотору тоже электричество нужно!»

✧ ГЛАВА 4. ЧТО ДАЛЬШЕ? КУДА ПОЙДЕТ ТУРБОГЕНЕРАТОРОСТРОЕНИЕ?

Как известно, турбогенераторами, установленными на тепловых и атомных электростанциях, вырабатывается примерно 80 % электрической энергии. Можно с уверенностью утверждать, что с небольшими отклонениями эта тенденция сохранится на ближайшие 30—40 лет. Интересно оценить пути развития турбогенераторостроения в будущем.

Начнем с современности. Международным исследовательским комитетом «Вращающиеся электрические машины» СИГРЭ* были даны рекомендации для конструкторов-разработчиков, направленные на повышение надежности работы турбогенераторов:



* Международный Совет по большим электроэнергетическим системам *CIGRE* (от французского *Conseil International des Grands Reseaux Electriques*) — это постоянно действующая неправительственная и некоммерческая международная ассоциация, центральный офис которой работает в Париже. *CIGRE* признана как ведущая всемирная электроэнергетическая ассоциация, охватывающая технические, экономические, организационные проблемы в области электроэнергетики, а также вопросы регулирования и охраны окружающей среды.

- должна быть обеспечена успешная эксплуатация по крайней мере двух прототипов машин;
- мощность новых типов турбогенераторов должна увеличиваться небольшими ступенями;
- конструкция должна развиваться преимущественно эволюционным путем — новое решение нужно вводить только после тщательного изучения.

Сегодня считается, что предельная мощность турбогенераторов на 3000 об/мин может достигать 1500 МВт, а турбогенераторов на 1500 об/мин — 2000—2500 МВт. Однако в последнее время усилилась тенденция отказа от разработки сверхмощных (свыше 1500—2000 МВт) турбогенераторов обычного исполнения (не сверхпроводниковых). Это обусловлено необходимостью обеспечения надежности и живучести энергосистем. Действительно, выход из строя генератора достаточной большой мощности требует мобилизации в электроэнергетической системе такой же резервной мощности для замещения, что не всегда возможно. Потеря же генерирующей мощности в несколько миллионов киловатт может привести к серьезным нарушениям в работе электроэнергетических систем. В этом смысле применение генераторов меньшей мощности (500—1000 МВт), обладающих достаточно высокими технико-экономическими показателями (прежде всего, высоким КПД), может оказаться очень эффективным для обеспечения надежности электроснабжения.

Необходимо подчеркнуть, что КПД мощных современных турбогенераторов уже приблизился к техническому пределу, и дальнейшее повышение его связано со значительными затратами из-за использования лучших материалов, совершенствования технологий изготовления, повышения качества вспомогательных систем.

Надежность турбогенераторов является важнейшей характеристикой их технического уровня. По данным США улучшение на 1 % коэффициента аварийности (или отношения числа часов внеплановых простоев к числу часов работы) примерно

эквивалентно 20 % первоначальной стоимости турбогенератора, а ущерб от вынужденного простоя в течение 2—3 месяцев соизмерим с первоначальной стоимостью турбогенератора.

Тенденция к снижению единичной мощности турбогенераторов позволяет вернуться к системам воздушного охлаждения и развивать их на новом уровне. Турбогенераторы с воздушным охлаждением, по сравнению с турбогенераторами, имеющими водородное или водяное охлаждение, обладают определенными преимуществами: дешевизна и повышенная надежность в эксплуатации, простота эксплуатации при минимальном числе обслуживающего персонала, повышенная маневренность, пониженная пожароопасность, сокращение сроков монтажа и затрат на эксплуатацию и ремонты, минимальная номенклатура запасных частей. Отсутствие масляных уплотнений вала исключает замасливание внутренних элементов статора и ротора, упрощает обслуживание в процессе эксплуатации и ремонта. Турбогенераторы с воздушным охлаждением не нуждаются в сложных системах подачи газа и воды, водоподготовки и фильтрации.

Оснащение энергоблоков безводородными генераторами обеспечивает наивысшую надежность и безопасность электростанций, персонала и окружающих территорий. В десятки раз снижаются огромные затраты на систему противопожарных мероприятий. И хотя масса турбогенераторов с воздушным охлаждением больше массы турбогенераторов с водородным и водно-водородным охлаждением, несмотря на это турбогенераторы с воздушным охлаждением имеют перспективы.

Тенденция выпуска турбогенераторов с воздушным охлаждением прослеживается не только на Западе (фирмы «Сименс», «Броун Бовери», «Ганц»), но и в России — такие турбогенераторы выпускаются ЛПЭО «Электросила» и Лысьвенским турбогенераторным заводом.

Интересное перспективное направление — беззубцовые турбогенераторы. Сейчас обмотка переменного тока закладывается в специальные пазы статора. Однако расстояние меж-

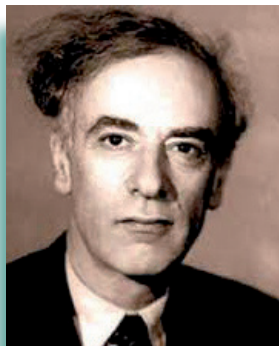
ду статором и ротором в крупных машинах уже столь велико, что в принципе проводники обмотки можно разместить непосредственно в воздушном зазоре. Если удастся это сделать и ликвидировать зубцы, пазы статора, то можно при нынешних габаритах получить еще большую мощность. Но тут тоже своя проблема — на обмотку действуют значительные электромагнитные силы, и очень сложно закрепить ее в воздушном зазоре. Видимый сегодня предел мощности турбогенераторов — 2500 МВт (3000 об/мин). При еще больших мощностях напряженность механических конструкций возрастет настолько, что центробежные силы разорвут узлы из самой прочной стали. Понадобятся непомерно большие роторы. Существуют и другие ограничения. Поэтому более мощные машины будут работать уже на других физических принципах — с использованием сверхпроводимости.

В начале XX в. было замечено, что ряду металлов и сплавов свойственна сверхпроводимость, то есть способность обладать нулевым сопротивлением при температуре, близкой к абсолютному нулю (около -270°C). Общая теория сверхпроводимости была построена в 1950 г. Л. Д. Ландау и В. Л. Гинзбургом. А в 2003 г. Нобелевский комитет принял решение присудить премию по физике троим ученым — Алексею Абрикосову, Виталию Гинзбургу и Энтони Леггетту — за вклад в теорию сверхпроводников и сверхтекучих жидкостей. Двое из троих лауреатов — российские физики. Виталию Гинзбургу удалось сформулировать теорию, а Алексей Абрикосов ее обосновал. Ученые приняли почетную награду из рук шведского короля. На церемонии награждения в своей речи Гинзбург пошутил, что «любовь к низким температурам у него еще с суровой военной зимы 1942 г. ».

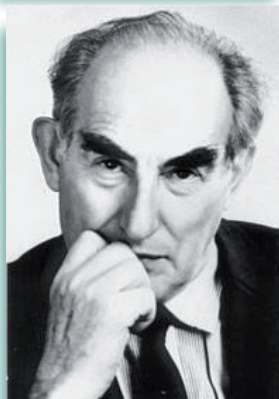
Лев Давидович Ландау (1908, Баку — 1968, Москва) — советский физик-теоретик, основатель научной школы, академик АН СССР с 1946 г. Лауреат Нобелевской премии по физике 1962 г. Герой Социалистического Труда, Лауреат медали имени Макса Планка, Ленинской (1962) и трех Государственных премий (1946, 1949, 1953). Иностраннный член Лондонского королевского общества, Национальной академии наук США, Датской королев-

ской академии наук, Королевской академии наук Нидерландов, Американской академии искусств и наук, Академии наук Германии «Леопольдина», Французского физического общества и Лондонского физического общества.

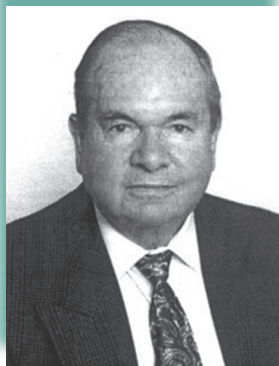
Ландау создал многочисленную школу физиков-теоретиков. Именем Ландау назван Институт теоретической физики РАН. Инициатор создания и автор (совместно с Е. М. Лифшицем) фундаментального классического курса физики, выдержавшего многократные издания на 20 языках.



Виталий Лазаревич Гинзбург (1916, Москва — 2009, Москва) — советский и российский физик-теоретик, доктор физико-математических наук, профессор. Родился в семье специалиста по очистке воды и врача. Будущий академик в школе проучился лишь 4 года. А уже на физфаке МГУ за три месяца прошел недостающий школьный курс. Научную карьеру Гинзбург начал аспирантом физического факультета МГУ. Закончив аспирантуру, сразу же защитил кандидатскую диссертацию. Внес большой вклад в развитие радиоастрономии. Основатель Комиссии по борьбе с лженаукой и фальсификацией научных исследований при Президиуме Российской академии наук. В 1995 г. Гинзбург получил Большую золотую медаль имени М. В. Ломоносова за выдающиеся достижения в области теоретической физики и астрофизики.



В 2003 г. Виталий Гинзбург получил Нобелевскую премию за вклад в развитие теории сверхпроводимости и сверхтекучести. В 2006 г. ученому вручили орден «За заслуги перед Отечеством» I степени за выдающийся вклад в развитие отечественной науки и многолетнюю плодотворную деятельность.



Алексей Алексеевич Абрикосов (1928, Москва) — советский физик-теоретик. Академик РАН, доктор физико-математических наук. Лауреат Нобелевской премии по физике (2003). Родился в семье врачей-патологоанатомов. По-

сле окончания Московского университета он под руководством Льва Ландау защитил кандидатскую диссертацию в Институте физических проблем. Преподавал в МГУ и Горьковском государственном университете, заведовал кафедрой теоретической физики в Московском физико-техническом институте. В 1987 г. Абрикосов стал действительным членом Академии наук СССР (сегодня Академии наук России).

В 1991 г. Абрикосова пригласили в Аргоннскую национальную лабораторию в Иллинойсе. Ученый переехал в США. Преподавал в Чикаго и в университете штата Юта. В 2000 г. стал почетным членом Академии наук США. В 2003 г. Алексей Абрикосов получил Нобелевскую премию по физике за вклад в развитие теории сверхпроводимости и сверхтекучести.

Долгое время сверхпроводники можно было использовать только при температуре жидкого гелия, что позволило создать ускорительное оборудование и магнитно-резонансные томографы.

В 1986 г. была получена сверхпроводимость при температуре около 30 К (или -243°C), что было удостоено Нобелевской премии, а в начале 1990-х гг. удалось достичь сверхпроводимости уже при 138 К, причем в качестве сверхпроводника использовались уже не металлы, а оксидные соединения.

Сверхпроводниковые турбогенераторы имеют в два раза меньшую массу и потери. КПД сверхпроводниковых генераторов может превышать 99 %, при этом потери, типичные для обычных генераторов, сокращаются минимум в два раза. Сверхпроводниковые турбогенераторы относятся к будущему поколению турбогенераторов. Для поддержания сверхпроводимости необходимы очень низкие температуры — около 4 К, что соответствует температуре кипения жидкого гелия. Если изготовить генератор со сверхпроводящими обмотками, это позволит резко увеличить электрические и магнитные нагрузки в его элементах и благодаря этому резко сократить их размеры. В сверхпроводящем проводе допустима плотность тока, в 10—50 раз превышающая плотность тока в обычном электрооборудовании. Магнитные поля можно будет довести до значений порядка 10 Тл, по сравнению с 0,8—1 Тл в обычных машинах. Если учесть, что размеры электротехнических

устройств обратно пропорциональны произведению допустимой плотности тока на индукцию магнитного поля, то ясно, что применение сверхпроводников уменьшит размеры и массу электрооборудования во много раз. Удивительно, что такого сокращения в эффективности, размерах и массе удастся достичь, даже несмотря на необходимость использования криосистемы для охлаждения сверхпроводника! Дополнительными преимуществами сверхпроводниковых генераторов являются повышенная стабильность работы при использовании в электрических сетях и большая долговечность. Срок службы обычных генераторов ограничен 30—40 годами из-за старения изоляции обмоток под действием высокой температуры. Этот неблагоприятный фактор полностью отсутствует у криогенных сверхпроводящих устройств.

В сверхпроводниковых генераторах используют самый эффективный охладитель в природе — жидкий гелий. Обмотка из сплава ниобия с титаном полностью теряет сопротивление постоянному току — становится сверхпроводящей. Открываются очень широкие перспективы. Плотность тока можно увеличить примерно в сто раз, а обмотка останется холодной. Тепло в ней не выделяется вовсе. И при той же мощности сверхпроводящий турбогенератор будет иметь примерно в 3—4 раза меньшую массу. Или наоборот, при той же массе существенно возрастет мощность.

Работы в этом направлении ведутся в ряде стран: США, государства Западной Европы и Япония имеют существенные успехи в области исследований и разработок сверхпроводниковых электрических машин. Наибольших успехов в области сверхпроводниковых турбогенераторов достигли Япония и США. В ФРГ были созданы основные элементы сверхпроводникового турбогенератора мощностью 800 МВ·А. В Японии в стадии изготовления находятся три сверхпроводниковых турбогенератора мощностью по 70 МВ·А каждый (рис. 25).



Рис. 25. Японский генератор *Super-GM* мощностью 70 МВт

В России основным разработчиком сверхпроводниковых турбогенераторов является ЛПЭО «Электросила». Последовательно растут мощности этих электрических машин: от турбогенератора мощностью 20 МВ·А (рис. 26, 27) — исследования, разработка методов расчета и технологических процессов, изготовление и испытания проводились под руководством и при непосредственном участии академика И. А. Глебова, Я. Б. Данилевича, А. А. Корытова, Л. И. Чубраевой, В. Н. Шахтарина — до турбогенератора мощностью 300 МВт (под руководством Г. М. Хуторецкого, при участии И. Ф. Филиппова как разработчика методов расчета теплофизических процессов и руководителя работ по созданию уникального криогенного стенда).

Сверхпроводящий генератор будет эффективным, если удастся до минимума свести приток тепла в зону самого жидкого гелия. Однако жидкий гелий очень дорог. Поэтому испарившийся гелий направляют в рефрижераторную установку, в которой он вновь сжимается. Приток тепла мощностью всего в один ватт за час испаряет 1,5 литра гелия. Чтобы скомпенсировать этот

ватт тепла — выработать соответствующий холод и превратить газ в жидкость, криогенное оборудование потребляет не менее 500 ватт мощности. Ясно, что при несовершенной теплоизоляции, при больших притоках тепла в зону жидкого гелия использование сверхпроводящих обмоток теряет смысл. До сих пор усилия конструкторов были направлены на отвод теплоты из машины, теперь решается проблема противоположная: как не допустить теплоту из окружающей среды к холодным обмоткам. Сложность создания криогенного турбогенератора в том, что жидкий гелий надо непрерывно подавать во вращающийся ротор. Ротор — самая сложная и напряженно работающая часть турбогенератора — становится еще и вращающимся криостатом.



Рис. 26. Генератор КТГ-20 на 20 МВт

Опытный генератор КТГ-1000, созданный под руководством академика И.А. Глебова, был в свое время самым крупным по габаритам криотурбогенератором в мире. Целью его создания было отработать конструкции вращающихся криостатов-холодильников больших размеров, устройств подачи гелия к сверхпроводящей обмотке ротора, а также исследовать работу сверхпроводящей обмотки ротора и способы захолаживания. Захолаживание ротора является весьма важной опера-

цией при эксплуатации сверхпроводниковых электрических машин. Процесс захлаживания состоит из трех этапов: охлаждение от температуры 300 до 80 К с помощью жидкого азота, вывод азота из полости ротора и охлаждение жидким гелием от температуры 80 до 4,2 К, когда обмотка возбуждения переходит в сверхпроводящее состояние.

Сверхпроводящая обмотка возбуждения турбогенератора КТГ-1000 выполняется из провода диаметром 0,7 мм с 37 сверхпроводящими жилами из ниобий-титана в медной матрице. Центробежные и электродинамические усилия в обмотке воспринимаются бандажом из нержавеющей стали. Между наружной толстостенной оболочкой из нержавеющей стали и бандажом размещен медный электротермический экран, охлаждаемый потоком проходящего в канале холодного газообразного гелия (он затем возвращается в конденсатор-ожижитель).

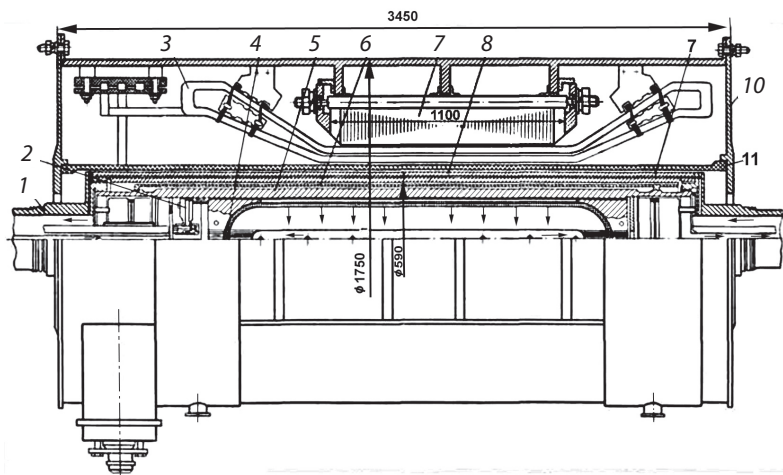


Рис. 27. Турбогенератор со сверхпроводящей обмоткой возбуждения мощностью 20 МВА с частотой вращения 3000 об/мин:

- 1 — вал ротора; 2 — токоввод; 3 — обмотка статора; 4 — обмотка возбуждения; 5 — бандажная труба с тепловыми мостами; 6 — экран; 7 — наружная оболочка ротора; 8 — демпферный экран; 9 — сердечник статора; 10 — корпус; 11 — разделительный цилиндр

Подшипники турбогенератора работают при комнатной температуре. Обмотка статора изготовлена из медных проводников (охладитель — вода) и окружена ферромагнитным экраном из шихтованной стали. Ротор вращается в вакуумированном пространстве внутри оболочки из изоляционного материала. Сохранение вакуума в оболочке гарантируют уплотнители.

Дальнейшее развитие сверхпроводниковых генераторов связано с переходом от низкотемпературной сверхпроводимости к высокотемпературной. Для этого необходимо создание соответствующих проводов, эффективно работающих при температурах 20—40 К. Если удастся создать сверхпроводники, работающие при температуре выше 77 К, можно будет перейти от жидкого гелия к жидкому азоту, а это существенно удешевит производство криотурбогенераторов.

Летом 2005 г. в Германии введен в эксплуатацию генератор первого поколения мощностью 4 МВт, работающий в этом температурном диапазоне (рис. 28).

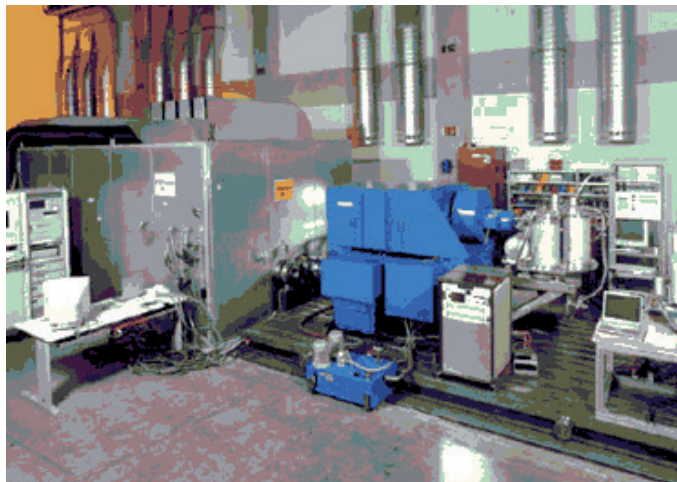


Рис. 28. Высокотемпературный сверхпроводниковый генератор производства *Siemens*

Этот генератор — результат совместной работы инженеров *Siemens* и производителей высокотемпературного сверхпроводящего провода (ВТСП) *European Advanced Superconductors GmbH (EAS)*. Менеджеры проекта предполагают использование таких генераторов на морских судах, оборудованных электромоторами. Уже в текущем столетии можно ожидать и создание энергетических сверхпроводниковых турбогенераторов.

В России в институте ВНИИЭлектромаш разработан проект синхронного ВТСП-генератора на 200 МВт на напряжение 220 кВ. Молодые специалисты Института электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук Н. Ю. Вандюк, И. В. Волынкин и С. С. Тимофеев получили престижную премию РАО «Единая энергетическая система» и Российской академии наук, называемую «Новая генерация», за работу «Разработка высоковольтного синхронного генератора с использованием высокотемпературной сверхпроводимости». Разработка связана с созданием ветроэнергетической установки, расположенной на платформе в океане. Использование ВТСП и других новых материалов в синхронном генераторе позволяет обеспечить уменьшенные массогабаритные характеристики, повышенную надежность, пониженные потери и экологическую безопасность машины, а значит, и ветроэнергетической установки в целом. Разрабатывается сверхпроводниковый синхронный генератор мощностью 500 кВт на напряжение 10,5 кВ. Генератор без промежуточного трансформатора соединяется с полупроводниковым тиристорным преобразователем, выпрямляющим генерируемый ток. Криогенное оборудование занимает место трансформатора в опорной башне ветроэнергетической установки, там же расположена преобразовательная установка. В цепь «генератор — преобразователь» могут быть включены накопители энергии (в том числе сверхпроводниковые) и сверхпроводниковые ограничители тока. Энергия передается потребителю по кабелю постоянного тока через выпрямительную подстанцию. Кабель проложен по дну моря и соединяет морскую платформу с потребителем на бе-

регу. Ротор и статор машины размещены в едином криостате. Высоковольтная обмотка статора выполнена из катушек седлообразной формы.

.....

Закончен наш рассказ об истории открытий и развитии электротехники, о незаурядных ученых и инженерах, преданных своей науке и создавших современные конструкции турбогенераторов, о напряженном и порой драматическом поиске, о борьбе идей. Авторы надеются, что у читателя сложилось представление об устройстве и работе электрогенератора — абсолютно необходимого элемента в производстве электрической энергии, основы всей современной цивилизации.

Студенты — остроумные люди

*

Действие происходит в американской тюрьме.

Осужденного ведут на электрический стул.

Надзиратель:

— Пожалуйста, дайте нам адреса ваших ближайших родственников.

Осужденный:

— Адреса? Чтобы выдать им мой прах?

Надзиратель:

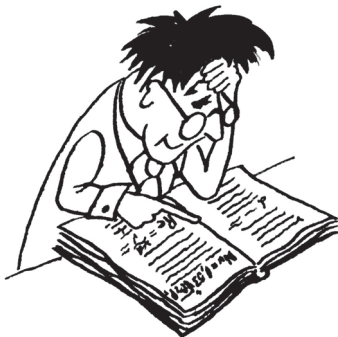
— Да нет, чтобы выслать им счет за электричество.

*

Новый стихотворный жанр — выживалки:

Чтоб не тревожить медицину,

Не суй конечности в машину.



*Чтоб не погибнуть невзначай,
Сперва проверь, потом включай.*

Не хватайся сразу за землю и фазу.

А и Б сидели на трубе.

А упало, Б пропало,

Они забыли про ТБ.



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов Б. Г. История энергетической техники / Б. Г. Кузнецов. М. ; Л. : ОНТИ, 1937. 312 с.
2. История электротехники / под редакцией И. А. Глебова. М. : Издательство МЭИ, 1999. 524 с.
3. Веселовский О. Н. Очерки по истории электротехники / О. Н. Веселовский, Я. А. Шнейберг. М. : Изд-во МЭИ, 1993. 252 с.
4. Баранов М. И. Электротехническая «война» постоянно-го и переменного токов: краткая история и области их современного применения / М. И. Баранов, Т. Д. Шерстюкова // Електротехніка і Електромеханіка. 2010. № 4. С. 3–9.
5. Копылов И. П. Электрические машины : учебник для вузов / И. П. Копылов. М. : Энергоатом, 1986. 360 с.
6. Лыткин В. В. Конструктивное устройство асинхронных турбогенераторов с воздушным охлаждением : учебное пособие / В. В. Лыткин, И. Е. Родионов. Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2013. 52 с.
7. Осин И. Л. Электрические машины: Синхронные машины : учебное пособие для вузов по специализации «Электромеханика» / И. Л. Осин, Ю. Г. Шакарян ; под ред. И. П. Копылова. М. : Высш. шк., 1990. 304 с.

8. Костенко И. П. Электрические машины : учебник для студентов высших технических учебных заведений / И. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. В 2-х ч. Ч. 1: Машины постоянного тока. Трансформаторы. Изд 3-е, перераб. Л. : Энергия, 1972. 544 с. Ч. 2: Машины переменного тока. Изд 3-е, перераб. Л. : Энергия, 1973. 648 с.
9. Проблемы создания сверхмощных турбогенераторов [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mosenergoinform.ru/articles/superturbo.html> (дата обращения: 08.06.2016). Загл. с экрана.
10. Сверхпроводники в энергетике. Генераторы переменного тока на сверхпроводниках [Электронный ресурс]. URL: http://perst.isssp.kiae.ru/supercond/bulletein.php?menu=bull_subj&id=125 (дата обращения: 15.06.2016). Загл. с экрана.



ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. ИЗ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН	8
ГЛАВА 2. КАК РАБОТАЕТ ГЕНЕРАТОР?.....	41
ГЛАВА 3. КАКОЙ ОН — РЕАЛЬНЫЙ ТУРБОГЕНЕРАТОР?	57
ГЛАВА 4. ЧТО ДАЛЬШЕ? КУДА ПОЙДЕТ ТУРБОГЕНЕРАТОРОСТРОЕНИЕ?	75
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	89

Учебное издание

Бродов Юрий Миронович
Родионов Игорь Евгеньевич
Ниренштейн Марина Алексеевна

ТУРБОГЕНЕРАТОР — ЭТО ОЧЕНЬ ПРОСТО

Редактор *В. О. Корионова*
Верстка *Е. В. Ровнушкиной*

Подписано в печать 07.12.2016. Формат 60×84 1/16.
Бумага писчая. Цифровая печать. Усл. печ. л. 5,35.
Уч.-изд. л. 3,5. Тираж 50 экз. Заказ 6.

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел.: 8 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: 8 (343) 350-56-64, 350-90-13
Факс: 8 (343) 358-93-06
E-mail: press-urfu@mail.ru



Бродов Юрий Миронович

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Турбины и двигатели»



Родионов Игорь Евгеньевич

Кандидат технических наук,
доцент кафедры «Электрические машины»



Ниренштейн Марина Алексеевна

Старший научный сотрудник кафедры «Турбины и двигатели»